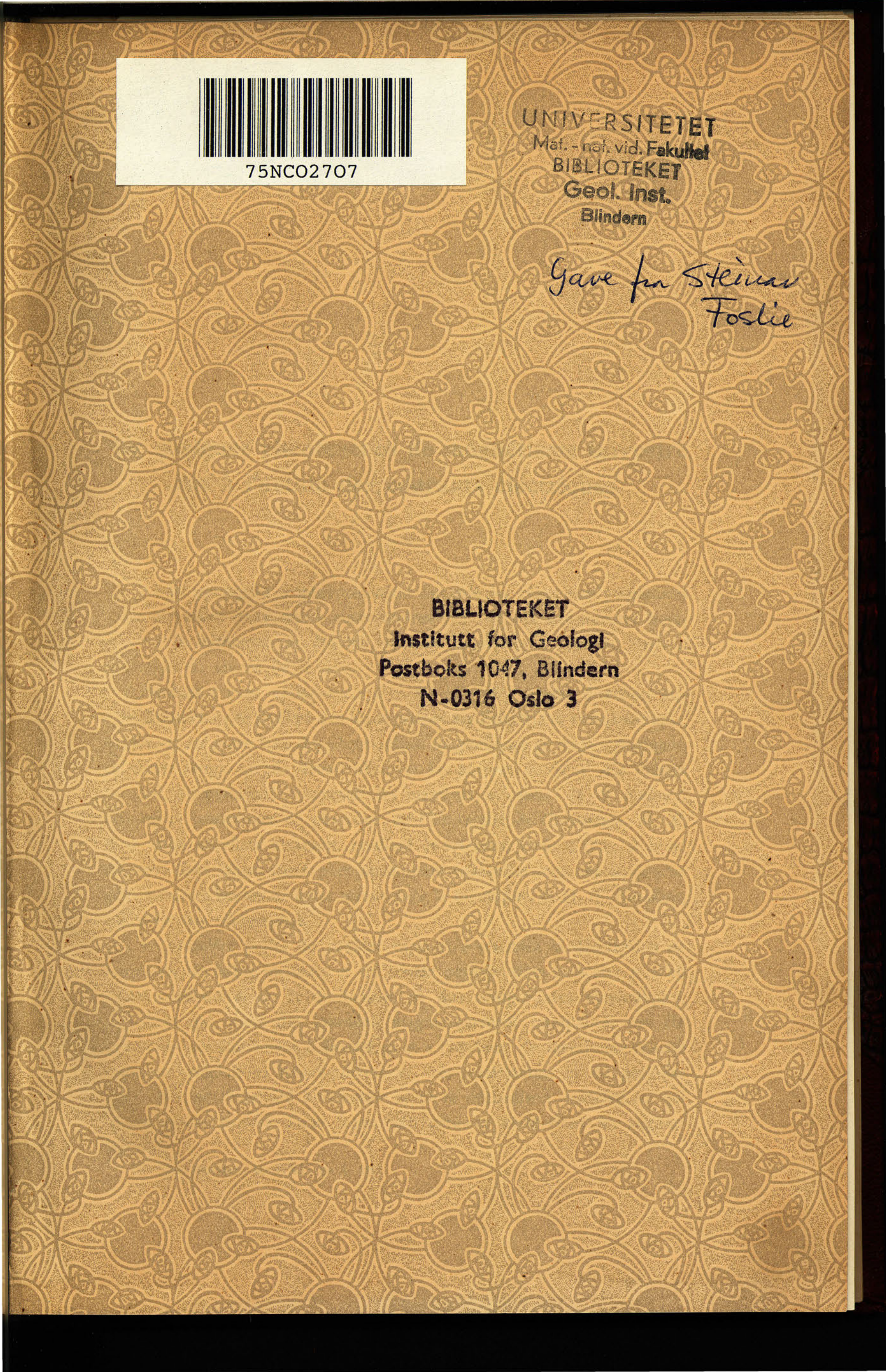




75NC02707
UNIVERSITETET
Mat. - nat. vid. Fakultet
BIBLIOTEKET
Geol. Inst.
Blindern
Gave fra Steinar Foslie
BIBLIOTEKET
Institutt for Geologi
Postboks 1047, Blindern
N-0316 Oslo 3



EXPEDITION NORVEGIENNE 1899-1900

POUR L'ETUDE DES AURORES BOREALES

RESULTATS DES RECHERCHES MAGNETIQUES.

PAR

KR. BIRKELAND.

Station de Talvik

e E Boye

Station de Haldde

LES PETITS OBSERVATOIRES DE HALDDE

D'APRES E. BOYE.

Expédition Norvégienne

de 1899—1900

pour l'étude des aurores boréales

Résultats des recherches magnétiques

par

Kr. Birkeland

Videnskabsselskabets Skrifter. I. Mathematisk-naturvidenskabelig Klasse. 1901. No. 1.

Udgivet for Fridtjof Nansens Fond

Christiania

En commission chez Jacob Dybwad

A. W. Brøgger, Imprimeur

1901

gave fra Steinar Foslie

Présenté à la séance du 23 novembre 1900.

IN MEMORIAM.



Elisar Boye

enseveli sous une avalanche à l'âge de 22 ans le 16 mars 1900.

Table des matières.

Sur quelques phénomènes de magnétisme terrestre dus à l'action des courants électriques.

L'état norvégien a généreusement accordé les ressources nécessaires pour construire deux petits observatoires pour l'étude des aurores boréales sur la montagne de Haldde près de Bossekop, à 1000 m. environ au-dessus du niveau de la mer.

Pendant l'hiver 1899—1900 il y fut envoyé sous ma direction une expédition chargée de faire des observations sur l'électricité atmosphérique, et devant en outre faire des observations magnétiques et metéorologiques, en même temps qu'elle devait observer les aurores boréales. En dehors de moi, l'expédition comprenait les membres suivants : M. *S. Sæland*, attaché au laboratoire de physique de l'Université de Christiania, M. *E. Boye*, mon excellent assistant, étudiant ès-sciences, victime d'un si cruel accident dans lequel deux personnes furent ensevelies sous une avalanche aux dernières heures de notre séjour dans la montagne, et M. *K. Knudsen*, ingénieur des télégraphes.

La première partie du présent rapport contiendra la description de variations de faible intensité et de courte période, d'un caractère plus au moins oscillatoire, de la déclinaison et des composantes magnétiques, variations qui, dans des journées magnétiquement tranquilles, ont été observées simultanément à Bossekop et à Potsdam. Je mentionne ensuite certaines ondulations très-régulières et très-persistantes, et de périodes différentes, de l'intensité horizontale et de la déclinaison, ondulations qui se présentent parfois d'une façon extrêmement nette dans les régions polaires.

La plupart de ces résultats ont été obtenus à l'aide d'appareils de variations très-délicats construits sur les indications de M. Eschenhagen, en combinaison avec des enregistreurs à marche rapide.

La seconde et principale partie du rapport rend compte d'une connexion intime qui a été constatée entre les fortes variations de l'intensité horizontale et de la déclinaison, semblables entre elles aux latitudes moyennes du globe, et les perturbations simultanées du même genre des trois éléments, et plus spécialement de l'intensité verticale, dans les régions polaires.

Il semble ressortir de la discussion de nos résultats que ces perturbations magnétiques et les aurores boréales sont des phénomènes secondaires et locaux se rattachant à un même phénomène cosmique. Ce phénomène primaire consiste, à n'en pas douter, en des courants électriques dans les couches supérieures de l'atmosphère; dans les régions polaires, où ils paraissent avoir leur point de départ, ces courants sont assez bien délimités et concentrés. Les courants passent en moyenne à une hauteur de 100 km. environ au-dessus de la surface terrestre et ils peuvent y atteindre au cours de fortes perturbations magnétiques, une intensité totale dépassant 400 000 ampères.

Mais, à mesure que le courant chemine vers le Sud, il se disperse et se partage, la partie orientale déviant fortement vers l'Est, tandis que la partie occidentale dévie vers l'Ouest.

Toutefois, ces deux branches semblent faire, retour vers le pôle par deux chemins différents, donnant ainsi lieu à deux tourbillons de courants, tournant en sens contraire.

On réussit à constater que de pareils courants ne participent pas à la rotation diurne de la Terre; sauf certains changements périodiques de direction probablement assez brusques, ils semblent en général conserver, de mois en mois, une position relativement fixe dans l'espace.

Ces résultats sont tirés de nos propres observations combinées avec d'autres observations correspondantes et simultanées, mises gracieusement à ma disposition par les observatoires de Pawlowsk, Copenhague, Potsdam, Paris, Greenwich et Toronto, mais aussi des observations à jours termes faites au cours des expéditions polaires de 1882—83.

I.

Petites variations magnétiques simultanées à Bossekop et à Potsdam. Ondes magnétiques.

1. Pour mettre en évidence l'existence de vibrations rapides dans l'intensité horizontale, M. Eschenhagen a, comme on le sait, installé a l'Observatore de Potsdam des unifilaires à haute sensibilité, où l'aiguille magnétique est suspendue par un fil de quartz très-ténu. Les ordonnées de la courbe de l'enregistreur correspondent à une variation de $4.\ 10^{-6}$ C. G. S. par millimètre pour la composante horizontale, et le papier photographique parcourt 24 cm. par heure.

Avec un appareil aussi sensible, les courbes ont montré des oscillations rapides de faible amplitude dont la période est généralement d'environ trente secondes, mais on en a observé quelquefois de plus courtes. Un autre fait remarquable est l'apparation de groupes d'ondulations plus larges, analogues aux battements de l'acoustique, trahissant l'existence de deux espèces de vibrations, de périodes peu différentes, par exemple dans le rapport de quatre à cinq.

Dans l'espoir de pénétrer plus à fond dans ces phénomènes si intéressants decouverts par M. Eschenhagen, en les étudiant dans les régions polaires, je me décidai à acquérir pour notre expédition un déclinomètre et un variomètre pour la composante horizontale semblables de tout point aux appareils installés à Potsdam et dûs au même constructeur, M. Toepfer de la même ville.

L'enregistreur employé se compose principalement d'un gros cylindre de 50 cm. de circonférence, qui porte la feuille photographique et fait une révolution suivant qu'il est nécessaire, soit en 24 heures, soit en 2 heures.

Sur cette feuille tournante, deux points lumineux tracent des courbes : d'abord un point fixe s'évanouissant quelques secondes à intervalles égaux pour indiquer les heures sur les feuilles — et en second lieu un point mobile indiquant les variations de l'aiguille du magnétomètre.

A notre station de Haldde, nous avons enregistré avec ces appareils très sensibles les variations de la déclinaison et de l'intensité horizontale tous les jours pendant plus de trois mois de l'hiver passé. Parmi les photogrammes obtenus, j'en discuterai d'abord quelques-uns provenant d'enregistrements spéciaux à grande vitesse faits simultanément par suite d'une entente spéciale à Potsdam et chez nous entre le 27 février et le 21 mars 1900.

2. Parmi les courbes de ces trois semaines, il s'en trouve plusieurs représentant les variations de la *déclinaison* aux deux endroits, et qui contiennent des parties pour ainsi dire identiques au point de vue des petites perturbations. Cette identité s'étend une fois même à toute une période d'enregistrement de deux heures.

C'est dans la nuit que nous avons obtenu ces courbes se rapportant aux heures magnétiquement peu agitées succédant à l'extinction des lueurs aurorales.

La fig. 1, pl. I, reproduit sans aucune retouche, d'après les photographies, les portions correspondantes des photogrammes représentant la déclinaison à Haldde et à Potsdam à peu près de $0^h\ 40^m$ à $1^h\ 33^m$ (heure de Gr.) la nuit du 3 mars; la fig. 2, même planche, les portions correspondantes de $0^h\ 33^m$ à $1^h\ 27^m$, la nuit du 4 mars.

On observe ici une similitude parfaite dans les moindres traits de ces courbes, leurs petites oscillations sont toujours identiques et les écarts des aiguilles magnétiques vont toujours dans le même sens, vers l'Ouest ou vers l'Est.

La sensibilité des appareils était telle que 1 millimètre de différence dans les ordonnées correspondait à une différence de déclinaison de 0'46 à Haldde et de 1' à Potsdam.

On se demande donc tout de suite si ces petites perturbations ont apparu simultanément aux deux stations distantes de 2000 km. environ, ou bien si l'on peut constater entre elles une différence de temps appréciable.

Pour avoir une réponse aussi précise que possible à cette question, nous avons, à notre petit observatoire de Haldde, noté les temps de disparition du point lumineux fixe de l'enregistreur toutes les 15 minutes d'après un chronomètre contrôlé deux fois par semaine par des signaux télégraphiques venant directement de l'observatoire de Christiania.

Nous croyons donc pouvoir garantir à 5 secondes près les diverses indications de nos planches, qui souffrent il va sans dire d'un manque de justesse soit en raison de la marche non uniforme du cylindre enregis-

treur, soit par suite des dilatations inégales des feuilles photographiques lors de leur traitement dans le bain de développement.

D'autre part, à Potsdam, les courbes correspondantes n'ont, pendant la nuit, que trois indications de temps, contrôlées directement par un chronomètre, les marques y étant mises automatiquement au commencement, au milieu et à la fin de chaque enregistrement pendant deux heures.

Le malheur a voulu que sur plusieurs des feuilles dont nous pouvons tenir un compte utile, il n'y ait qu'une seule de ces marques contrôlées qui soit nette et bien visible.

Donc en comparant les deux séries de diagrammes, nous ne pouvons pas en garantir à 5 secondes près les diverses indications. Mais je crois qu'en général nous pourrons les garantir à 10 secondes près.

Maintenant pour les 44 petites perturbations rapides dans la déclinaison que j'ai trouvées faciles à identifier, les mesures de leurs positions relatives dans les deux séries de diagrammes indiquent des différences dans le temps d'apparition aux deux endroits comprises entre ± 18 secondes, mais dans 38 cas pourtant entre ± 10 secondes seulement.

Le signe + signifie que la perturbation a eu lieu à Potsdam plus tôt qu'à Bossekop. Pour l'ensemble des 44 cas, la différence moyenne est de 1 seconde.

Il est donc clair que les différences de temps en question sont trop petites pour se laisser mesurer exactement à l'aide de nos courbes. Cependant, il semble bien ressortir déjà de nos mesures que les perturbations magnétiques dont il s'agit doivent leur origine à des courants électriques variables, et s'il en est ainsi, on n'arrivera certainement pas à mesurer la vitesse de propagation des perturbations même avec nos méthodes les plus exactes d'enregistrement.

3. Si nous passons aux courbes représentant les variations simultanées de *l'intensité horizontale* à notre station et à Potsdam, nous constatons bien vite qu'il n'est pas à beaucoup près aussi facile d'y trouver des parties semblables que pour les courbes correspondantes de déclinaison. Il en existe cependant quelques-unes, mais sur celles-ci une diminution de l'intensité à Haldde correspond très-souvent à une augmentation de l'intensité à Potsdam et vice versâ.

C'est ce qui semble surtout arriver quand les perturbations semblables se laissent constater simultanément aux deux stations, soit dans l'intensité horizontale, soit dans la déclinaison. Dans ce dernier cas, le plus simple est de supposer les perturbations magnétiques produites par des courants alternatifs cheminant au-dessus des deux stations suivant une trajectoire de courbure simple, sans inflexions.

Toutefois, il convient d'y insister, nos courbes montrent que même dans le cas d'un parallélisme parfait entre les perturbations de la déclinaison aux deux endroits, il arrive souvent que ces variations de la déclinaison sont accompagnées d'oscillations simultanées de l'intensité horizontale ayant une toute autre période.

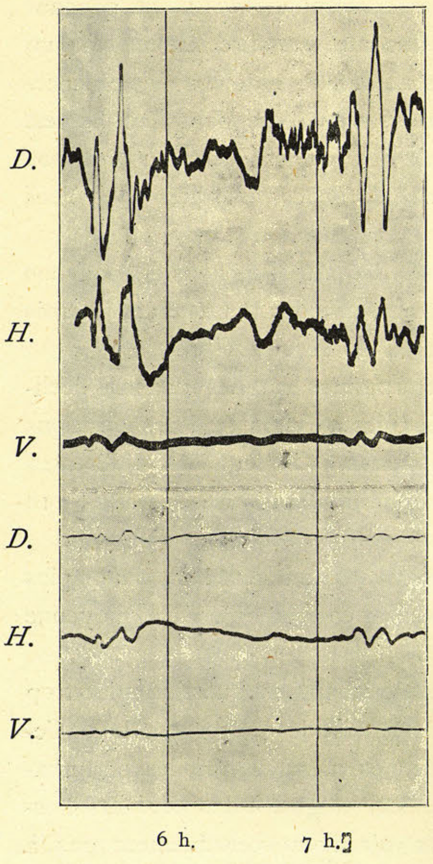


Fig. 1.

En ce qui concerne la différence du temps d'apparition entre les perturbations semblables dans l'intensité horizontale à Haldde et à Potsdam, il parait clairement qu'elle ne se laisse pas plus que les perturbations de la déclinaison mesurer avec la précision d'enregistrement dont nous disposons. Sur 21 mesures que j'ai faites sur nos planches, je trouve des différences comprises entre — 2 sec. et + 15 sec. En moyenne la différence est de + 7 sec.

La figure 1 ci-jointe rend compte d'un cas intéressant de perturbation simultanée des trois éléments à Haldde et à Potsdam, le 24 février vers 6^h 30 du matin, temps de Greenwich. L'enregistrement était à mouvement lent, à 24^h par révolution du cylindre. La sensibilité était la suivante : 1 mm. des ordonnées correspondait

	D.	*H.*	*V.*
à Haldde . . .	à 0'46	$75 \cdot 10^{-7}$	$122 \cdot 10^{-6}$
à Potsdam . . .	à 1'	$325 \cdot 10^{-7}$	$29 \cdot 10^{-6}$

La déclinaision augmente vers l'Ouest, lorsque les ordonnées vont en augmentant; de même les intensités vont en croissant avec les ordonnées sauf pour l'intensité horizontale à Haldde, où elle va en diminuant lorsque les ordonnées augmentent.

4. On n'a, autant que je sache, jamais constaté une similitude et une simultanéité aussi parfaites des petites variations rapides dans les éléments magnétiques sur deux points à beaucoup près si éloignés que Bossekop et Potsdam.

Nous discuterons plus tard la cause probable de cet accord, mais nous ferons remarquer dès maintenant que ces petites perturbations sont certainement en rapport intime avec les grands troubles magnétiques qui se manifestent généralement aux mêmes époques approximatives sur toute la surface du globe, mais avec de grandes divergences dans la grandeur des effets et quelquefois même avec un changement de sens d'un hémisphère à l'autre. En comparant les troubles observés de 1882 à 1889 dans les stations de Greenwich, Pawlowsk, Toronto, l'Ile Maurice, Zi-Ka-Wei, Melbourne et le Cap Horn, M. Ellis[1] conclut que les débuts du phénomène sont pratiquement simultanés, eu égard au degré d'approximation que comportaient les enregistreurs, et qu'il en est sans doute de même pour toute la surface du globe. Sur dix-sept jours choisis comme correspondants aux résultats les plus complets, l'écart moyen des heures est compris entre $\pm$ 3′. Comme nous verrons plus tard ces résultats ne peuvent pas être acceptés sans une certaine réserve.

5. Ondes magnétiques. Je vais maintenant mentionner quelques cas d'oscillations magnétiques trés-régulières et d'une persistance relativement très grande, que nous avons observées à notre station de Haldde. tant dans la déclinaison que dans l'intensité.

On trouvera par exemple reproduits dans les figures deux cas différents de ces oscillations observés l'un (fig. 2) le 20 mars vers 22^h 51^m, heure de Greenwich, avec une période de 62 secondes et l'autre (fig. 3) le 19 mars vers 11^h 27^m avec une période d'environ 130 secondes.

La première série d'ondes se rapporte à l'intensité horizontale enregistrée à grande vitesse, la seconde se rapporte à la déclinaison enregistrée à petite vitesse. Ces figures sont une reproduction photographique des courbes originales dans le rapport de 4 à 3 et chaque millimètre dans les ordonnées correspond ici à $41 . 10^{-7}$ C. G. S. dans la figure 2 et à 0′34″ dans la figure 3.

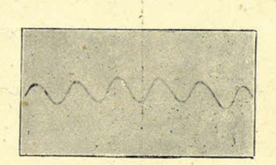


Fig. 2.

Fig. 3.

D'autres longueurs d'ondes ont aussi été observées à notre station de Haldde.

Ces ondes que nous avons vues si régulièrement développées à notre station sont évidemment analogues à celles découvertes par M. Eschenhagen à Potsdam, seulement chez lui la période d'onde tourne autour de 30 secondes.

[1] *W. Ellis*, Proc. of the R. Soc., Vol. 52, p. 191, 1892.

A l'observatoire magnétique de Potsdam, que je viens d'aller voir, on a eu l'obligeance de mettre à ma disposition tous les riches matériaux d'enregistrement à grande vitesse qui y sont déposés, afin que je pusse voir si je retrouverais là des longueurs d'ondes correspondantes à celles que nous avons trouvées à Haldde. J'ai donc fait un très grand nombre de mesures des périodes d'ondes à l'aide de ces matériaux. Seulement à Potsdam les ondes magnétiques ne paraissent jamais être si nettes et si persistantes que je les ai trouvées plusieurs fois à Haldde pendant 3 semaines, et même dans le cas où elles sont assez nettes, les ondes de Potsdam ne font pas l'impression d'être des ondes simples. Pour cette raison, plusieurs des valeurs obtenues pour la période d'onde moyenne dans les 112 cas où j'ai crû pouvoir faire une mesure ne méritent qu'une confiance limitée.

6. Voici les résultats de ces mesures:

Dates	Nombre d'ondes	Périodes T en secondes	Dates	Nombre d'ondes	Périodes T en secondes
1898			1898		
31 mai	13	35.9	17 décbre	25	30.7
31 «	9	35.8	17 «	10 nettes	30.6
31 «	6 régulières	41.9	17 «	15	29.1
13 juin	22	34.5	20 «	14	29.1
16 août	6 peu nettes	81.0	29 «	8	34.4
18 «	20 —«—	15.4	sans date	13	34.2
18 «	4 régulières	22.5			
19 «	9	28.6			
19 «	5	30.6	1899		
19 «	2 régulières	27.0			
19 «	3 —	35.0	2 janvier	2	33.7
20 «	3 —	29.0	2 «	8	37.5
8 septbre	17 —	36.4	18 «	6	33.5
8 «	5 —	32.1	20 «	4	30.8
15 «	16	36.6	16 février	13	34.1
15 «	23	28.8	16 «	9	29.3
15 «	4 régulières	33.0	16 «	3	ca. 11.0
15 «	7	28.3	16 «	6 grandes	35.6
6 octobre	10	29.7	16 «	6 faibles	32.5
1 novbre	4	64.4	17 «	7	10.9
2 «	14	27.5	17 «	5	11.2
15 «	12	38.9	17 «	13	11.2
17 «	27 peu nettes	12.7	17 «	4	49.5
18 «	13 régulières	32.8	17 «	4	28.6
18 «	5	36.0	20 «	3	40.1
18 «	4	36.5	20 «	5	31.4
18 «	12	32.6	10 avril	4	11.0
19 «	10 régulières	33.2	17 «	7	12.0
19 «	10 —	32.8	17 «	7 peu nettes	33.2
22 «	11 mélangées	17.6	17 «	11	35.4

Dates	Nombre d'ondes	Périodes T en secondes	Dates	Nombre d'ondes	Périodes T en secondes
1899			1900		
12 mai	4	40.7	2 mars	9 régulières	10.3
12 «	5 pures	32.1	10 «	25	8.9
12 «	5	33.6	11 «	34	8.4
1 juin	6	27.0	12 «	20	8.6
4 août	8 inégales	35.2	12 «	23	8.2
4 «	5 —	32.8	12 «	33	7.9
7 «	14 —	36.1	13 «	8	7.9
29 «	10 imparfaites	14.4	14 «	10	9.0
8 septbre	14 inégales	14.4	14 «	10	9.3
8 «	10 régulières	30.2	14 «	12	7.8
30 «	7	43.3	14 «	12	8.5
7 octobre	7	36.4	15 «	14	9.1
7 «	3 régulières	33.0	15 «	18	8.8
7 «	9	35.3	15 «	20	8.5
7 «	42	34.6	15 «	22	8.0
19 «	6	77.4	1 avril	9	62.2
26 «	16 peu nettes	39.2	2 «	5	49.2
27 «	18 —	35.2	21 «	8	93.8
1 novbre	17	30.3	8 mai	3	96.0
15 «	20	14.7	19 «	7	95.4
14 décbre	10	43.9	19 «	6 faibles	28.0
20 «	8	39.4			
21 «	11	40.2			
			à Bossekop.		
1900			1900		
2 janvier	7 peu nettes	43.6	15 mars	32	94.8
26 «	10	26.6	15 «	20	95.4
17 février	19	12.0	17 «	30	108.0
17 «	10	11.6	17 «	83 faibles	99.1
25 «	5	106.5	19 «	24	129.8
25 «	3 peu nettes	125.0	20 «	6	62.0

7. J'ai rangé graphiquement (fig. 3, pl. I) les résultats dans l'espoir que les valeurs des différentes périodes se grouperaient *nettement* autour de certaines valeurs fixes. Cet espoir a été déçu.

D'un autre côté il est évident que les différentes périodes ne revêtent pas des valeurs arbitraires : il existe indubitablement un mode ou l'autre de groupement.

Il semble bien qu'il existe une période d'à peu près 8 secondes, une de 11 secondes, peut-être aussi une de 15 secondes, etc.

On retrouve facilement les ondes de M. Eschenhagen avec une période d'à-peu-près 30 secondes. En mesurant sur les planches la lon-

gueur de ces ondes j'ai gardé l'impression qu'il y a presque toujours deux ou plusieurs ondes à périodes voisines s'accompagnant l'une l'autre. Chez nous, sur la montagne de Haldde, nous n'avons pas encore vu ces ondes d'une période de 30 secondes se manifester bien nettement.

Les oscillations magnétiques dont nous venons de parler sont certainement dues à des courants électriques alternatifs, soit telluriques soit atmosphériques. Nous verrons tout à l'heure combien il est probable qu'ils sont dûs à des courants de cette espèce circulant dans l'atmosphère.

On peut dire que ces petites oscillations manifestent une tendance au groupement qui, si faible qu'elle soit, n'en est pas moins du plus grand intérêt.

Il serait très important de reconnaître si ces oscillations sont peut-être dues à des vibrations électriques propres à la sphère terrestre, ou si elles sont imposées à la Terre du dehors, et sont d'origine solaire, ou bien encore si elles sont dues à des décharges locales.

Dans le premier cas, les périodes des ondes doivent être fixes et se retrouver d'un enregistrement à l'autre et aux différents endroits de la Terre, sauf toutefois sur quelques lignes nodales. Dans le second cas aussi, les périodes des oscillations pourraient peut-être se retrouver d'une façon analogue. Dans le dernier cas au contraire, il semble plus naturel que les périodes prennent toutes les valeurs possibles en deçà d'une certaine limite.

Il est évident que des enregistrements de précision dans les régions polaires seraient d'une haute importance pour décider la question de savoir si ces oscillations se grouperaient peut-être d'une façon parfaitement nette dans une certaine série d'harmoniques; car à ces hautes latitudes, les oscillations sont sans doute plus fréquentes, plus régulières et plus persistantes que partout ailleurs.

Il est clair que c'est seulement par une longue série de mesures exactes qu'on pourra arriver à une certitude sur ce point, car si on a en effet affaire à des oscillations harmoniques, elles sont certainement d'ordre élevé, ce qui rend leur constatation d'autant plus difficile.

8. Au cours des enregistrements magnétiques à grande vitesse rapportés ci-dessus et effectués entre le 27 février et le 21 mars 1900 sur la montagne de Haldde, nous avons toujours cherché à enregistrer d'une même manière l'électricité atmosphérique, dans l'espoir de réussir peut-être à décider si les ondulations magnétiques en question ne seraient pas accompagnées d'ondes électriques correspondantes.

Nous avons eu recours pour cela à un électromètre d'Elster et Geitel disposé pour l'enregistrement photographique par le constructeur Günther de Brunswick.

Grâce à certaines modifications introduites plus tard par nous, cet appareil travailla à notre satisfaction avec l'enregistreur. Comme collecteur nous nous servions d'une plaque métallique enduite de radium et protégée de diverses façons contre les inconvénients pouvant résulter de coups de vent et de congélation.

Ce radium m'avait été gracieusement offert par M. et Mme Curie.

Lorsque le cylindre de l'enregistreur opérait sa révolution en deux heures, on demandait le plus souvent à l'électromètre une très-grande sensibilité, jusque dix fois plus grande que lorsque la révolution de l'appareil avait lieu en 24 heures. On y arrivait en augmentant la tension sur les quadrants, tandis que par une torsion convenable du fil de platine servant à la suspendre, l'aiguille communiquant avec le radiateur était amenée à sa position normale.

Quant aux résultats de ces enregistrements électriques, je dirai seulement ici que par les photogrammes destinés à mettre en évidence les variations faibles de l'electricité atmosphérique, on ne constate pas l'existence d'une corrélation claire entre les petites perturbations électriques et magnétiques de courte durée. Il faut cependant remarquer que l'air ne fut pas parfaitement clair une heure entière au cours des trois semaines en question, et qu'en réalité, il y a deux photogrammes seulement qui aient quelque valeur comme se prêtant à la comparaison que nous avions en vue.

Si, par exemple, il y avait dans l'air la moindre trace de cristaux de glace, — cas qui se présenta alors très fréquemment — le point lumineux mobile oscillait sans interruption d'un côté à l'autre du champ de l'enregistreur.

Mais, comme je l'ai dit, les deux photogrammes que je crois aptes à servir ne manifestent pas de relation directe avec les perturbations magnétiques correspondantes. Peut-être ne fallait-il d'ailleurs pas s'y attendre, alors même qu'il existerait une connexion réelle entre les oscillations électriques de l'atmosphère et les ondulations magnétiques qui nous occupent, car s'il s'agit d'ondes stationnaires, il devra y avoir, correspondant aux milieux des ventres des ondes magnétiques d'une période donnée, des noeuds dans les ondes électriques et vice versâ.

Peut-être eût-on dû comparer plutôt les courbes électriques de Haldde

avec les courbes magnétiques de Potsdam. C'est là une comparaison que je n'ai pas faite encore.[1]

[1] Les résultats précédents et les idées qu'ils m'ont suggérées ont été communiqués au Congrès de Physique, à Paris, le 9 août 1900.

J'apprends avec une grande satisfaction que M. A. Nippoldt à Potsdam, à qui je suis si redevable pour ses bienveillants services, semble être arrivé à des idées analogues aux miennes.

C'est ainsi qu'il me dit dans une lettre du 1. décembre 1900: »Auch ich habe mich in letzter Zeit viel mit Studien über den Zusammenhang zwischen Luftelektricität und Erdmagnetismus abgegeben. Die von Ihnen gefundenen harmonischen Beziehungen zwischen den kleinen Schwingungen liessen sich als Schwingungen der elektrostatischen Ladung der Erde erklären, die nur in den gefundenen harmonischen Verhältnissen stehen können, da nur für diese die Erde ein Resonator ist. Da die Sonne die Oscillationen erzeugt, spürt man sie auf der ganzen Erde, doch können gewisse Wellen an bestimmten Orten stets unterdrückt werden, so dass in Potsdam gewisse Wellenlängen, die in Bossekop vorkommen, nicht auftreten.«

Note.

L'existence de perturbations simultanées de très-courte période, s'étendant sur de grandes parties du globe terrestre, peut permettre de transmettre des signaux de temps à une station polaire fort éloignée, par une sorte de télégraphie sans fil.

Il suffirait d'utiliser pour l'enregistrement des perturbations magnétiques la vitesse la plus grande possible de l'enregistreur, dont la marche devrait être constamment contrôlée aux deux stations à l'aide d'un chronomètre, en même temps qu'on utiliserait la sensibilité la plus grande possible des magnétomètres.

Il semble que plusieurs savants, qui ont expérimenté sur la télégraphie sans fil, p. ex. Marconi et Tesla, aient observé des phénomènes semblant provenir d'oscillations électriques de l'atmosphère.

Comme nous le verrons au chapitre suivant, il y a précisément dans les couches supérieures de l'atmosphère un puissant courant électrique s'étendant à toute la Terre; les variations de ce courant, qui est certainement dûs à des causes cosmiques, peuvent être d'une période très-courte. M. Tesla est, dit-on, d'avis que les phénomènes en question observés par lui proviennent de la planète Mars. Pour ma part, je crois fort possible que des éruptions volcaniques ayant lieu sur cette planète soient accompagnées de décharges électriques assez fortes pour se manifester par des pulsations appréciables du courant constaté par nous. Quant à supposer qu'il s'agisse d'expériences électriques gigantesques exécutées par des habitants de Mars, je crois qu'il y a là une hypothèse à laquelle nous préférerions n'avoir recours qu'en tout dernier ressort.

II.

Courants électriques dans les couches supérieures de l'atmosphère.[1]

9. Nous allons maintenant nous occuper des perturbations considérables et de durée relativement longue dans les éléments magnétiques. C'est surtout quand, aux perturbations de cet ordre observées dans les régions polaires, on compare des perturbations correspondantes sur d'autres points du globe, qu'on découvre différentes circonstances méritant l'examen le plus approfondi.

Mais avant de se livrer à l'analyse de ces phénomènes, il est utile et nécessaire de se faire une idée des causes possibles de pareilles perturbations.

Sur ce point, j'ai pu tirer de bons éclaircissements de la comparaison qu'il m'a été donné de faire entre les photogrammes journaliers d'enregistrement magnétique collectionnés pendant plus de trois mois à notre station de Haldde et les photogrammes correspondants obtenus à Potsdam. On trouve ainsi que des variations semblables ont lieu simultanément aux deux stations *pour toutes les amplitudes possibles.* Il n'y a donc pas de raison pour admettre que la cause des grosses perturbations correspondantes diffère essentiellement de celle qui produit les petites perturbations simultanées.

Or, nous sommes arrivés dans ce qui précède, par la discussion de nos photogrammes obtenus par enregistrement à grande vitesse, à la conclusion que les petites variations des éléments magnétiques devaient être dues à des courants électriques variables. Car la différence entre les temps d'apparition des variations subites homologues à Haldde et à Potsdam était en moyenne certainement inférieure à quelques secondes.

Nous concluerons donc que les grandes perturbations sont dues, elles aussi, à des courants électriques embrassant de grandes parties de la surface du globe.

---

[1] La découverte des courants décrits dans le présent chapitre a été annoncée dans un discours prononcé le 12 octobre 1900 devant la Société des Sciences de Christiania.

Il est vrai qu'on découvre sans peine un fait qui semble militer contre cette opinion. On reconnait en effet que les différents maxima ou minima des grandes perturbations simultanées ont lieu sur différents points du globe à des moments qui ne concordent pas absolument. C'est là ce qui apparait très-nettement, lorsque l'on compare les photogrammes caractéristiques enregistrés simultanément en de nombreux points du globe terrestre.

Nous renvoyons provisoirement aux planches III à VII représentant les éléments magnétiques en 7 stations différentes, dont quelques-unes très-éloignées les unes des autres.

Il appert de ces courbes avec toute la clarté désirable que les perturbations atteignent plus vite leur maximum d'amplitude aux stations situées à l'Est qu'à celles situées vers l'Ouest, et que cet écart ne laisse pas d'être considérable. Ce fait intéressant, sur lequel nous nous réservons de revenir plus tard, ne suffit cependant pas à infirmer notre proposition, à savoir que les grandes perturbations sont dues à des courants électriques émanant des régions polaires et se répandant à la surface de la Terre.

Ce retard dans la phase se laisse en effet expliquer très-naturellement, alors même qu'on persiste à prétendre que les perturbations sont imputables à des courants électriques. Car des pulsations particulières de ces courants qui donnent lieu aux variations magnétiques de courte période ont lieu simultanément sur les divers points du globe atteints par ces courants, bien qu'avec une intensité différente.

Il s'ensuit que l'onde d'enveloppe résultant de l'interférence des pulsations consécutives peut fort bien avoir un caractère analogue en deux points du globe très-éloignés l'un de l'autre, en même temps qu'un de ces points peut retarder sur l'autre, quant au moment d'apparition des amplitudes maximum et minimum.

10. Il s'agit tout d'abord de décider dans quelle mesure les courants en question sont telluriques ou atmosphériques, et en second lieu de déterminer leurs trajectoires moyennes. Disons dès maintenant que nous arriverons bientôt par nos recherches à faire des constatations nous forçant à conclure que les courants en question circulent dans l'atmosphère. Nous chercherons donc tout d'abord à fixer les trajectoires moyennes des courants, en admettant comme prouvé qu'il convient de les aller chercher dans les couches les plus élevées de l'atmosphère. Nous admettons de plus que la direction du champ des forces perturbatrices est, au moins approximativement, déterminée par la loi d'Ampère, par rapport aux parties de courant les plus rapprochées de l'endroit considéré.

On ne tardera pas à reconnaître que cette hypothèse est pleinement justifiée.

11. Pour reconnaître maintenant si certaines directions de courants prédominent spécialement aux environs de Bossekop, j'ai extrait de nos photogrammes toutes les perturbations marquées dont l'on pouvait jusqu'à un certain point fixer la grandeur en raison du repos relatif existant dans les éléments magnétiques avant et après la perturbation. En reliant par des lignes droites les portions tranquilles des courbes, j'ai pu mesurer l'amplitude de la perturbation à un instant donné. Cette méthode appliquée à la mesure de l'amplitude des perturbations n'est pas exempte d'un certain arbitraire. Je crois cependant qu'en intercalant comme je l'ai fait des lignes droites convenables, on arrive à se faire une idée plus sûre des perturbations d'origine électromagnétique qui ont lieu à un moment donné, que lorsqu'on s'astreint à mesurer toujours les perturbations en se basant sur les valeurs moyennes journalières.

Lorsqu'on a ainsi mesuré une variation δ de la déclinaison, on trouvera la composante de la force perturbatrice R_p, perpendiculaire au méridien magnétique, composante que nous désignerons par D_p, en vertu de la formule

$$D_p = (H + H_p) \operatorname{tg} \delta,$$

où H_p est la composante horizontale de R_p située dans le plan du méridien. Comme H_p est généralement assez petit, on aura approximativement

$$D_p = H \delta.$$

Si l'on calcule la résultante de D_p et de H_p, on pourra tirer de cette résultante, en vertu de la loi d'Ampère, la direction que le courant électrique supposé doit avoir occupée dans les couches élevées de l'atmosphère aux endroits considérés.

Nous supposons ici que les courants sont dirigés à peu près parallèlement à la surface terrestre.

Ce postulatum donne lieu, j'en conviens, à une certaine inexactitude, attendu qu'il est probable que dans les régions polaires, il y a aussi parfois des courants pas tout à fait négligeables dirigés verticalement entre la Terre et l'atmosphère ou inversement, ainsi que l'affirment entre autres *Adam Paulsen*[1] et *Lemström*[2].

---

[1] *Adam Paulsen:* Sur la nature et l'origine de l'aurore boréale. Copenhague 1893.

[2] *Lemström:* On the earth-currents and the electrical currents in the atmosphere and their relations to the earth-magnetism. Helsingfors 1899.

Mais en général de pareils courants ne doivent pas contribuer d'une façon bien essentielle à la production des grandes perturbations dans les éléments horizontaux. C'est là ce qu'il est permis de conclure, tant de l'allure des perturbations correspondantes de l'intensité verticale dans la région polaire considérée, que du fait que les mêmes perturbations dans les éléments magnétiques que nous avons trouvées dans les régions polaires se retrouvent sans peine, en leurs traits essentiels, en des observatoires répartis sur des portions considérables de la surface du globe.

Le fait que nous venons de signaler en dernier lieu montre clairement que les pulsations en question du courant électrique doivent s'étendre sur de vastes portions de la surface terrestre : on reconnaît en effet sans peine que l'influence perturbatrice prédominante exercée par de pareils courants sur les éléments horizontaux sont imputables aux parties du courant qui passent juste au-dessus de l'endroit considéré, tandis que l'influence exercée sur l'intensité verticale est imputable aux courants passant dans le voisinage du même endroit.

12. La fig. 1, pl. II, indique la direction des courants horizontaux dans l'atmosphère pouvant avoir produit toutes les perturbations essentielles des éléments horizontaux constatées par nous à Haldde pendant l'hiver 1899—1900.

Les vecteurs qui y figurent donnent la mesure relative de l'action des courants au point d'observation, leur longueur étant dans chaque cas portée égale à la résultante de D_p et de H_p.

Comme on le conçoit aisément tous ces vecteurs représentant les courants sont rapportés le long d'un axe des temps divisé en 24 heures et compté de midi à midi, temps de Greenwich, afin de reconnaître si ces courants ont une période journalière.

La direction perpendiculaire à l'axe des temps est supposée parallèle au méridien astronomique de Bossekop, le Nord étant tourné vers le haut. Les vecteurs en traits pleins représentent les courants dont la trajectoire moyenne recoupe le méridien de Bossekop au Nord de cette localité; les vecteurs en pointillé ceux dont la masse principale passe au méridien au Sud de Bossekop. On se fixe là-dessus en discutant les perturbations de la composante verticale conformément à la loi d'Ampère.

J'ai traité d'une façon analogue les matériaux magnétiques pour les jours-termes aux stations de Bossekop, Jan Mayn, Fort Rae, Christiania et Pawlowsk pour les années 1882 et 1883.

Les figures de la pl. II fournissent la représentation graphique des résultats obtenus.

L'échelle des vecteurs est 5 fois plus grande aux fig, 1, 8, 9, 10 et 11 qu'aux autres figures. J'ai fait cela pour des motifs d'ordre pratique, attendu que les perturbations sont, on le sait, bien plus grandes dans les régions polaires que dans les pays plus méridionaux.

Si la fig. 1 est à grande échelle, quoique se rapportant à ~~Bossekop~~, c'est parceque la figure ne contient pas les plus grandes perturbations de 1899—1900. Cela tient à ce que nos instruments de variation servaient à l'enregistrement, tantôt à grande, et tantôt à petite vitesse, et que par suite nous ne pouvions pas rendre les instruments suffisamment insensibles pour servir à l'enregistrement des plus grandes perturbations, les points lumineux sortant alors du champ de l'enregistreur.

Partout dans les figures, le temps dont on s'est servi est celui de Greenwich.

L'échelle 1 dans nos figures originales est telle que $+1.10^{-4}$ C. G. S. était représenté pour H_p par 1 mm. vers le Nord sur la direction du méridien magnétique, tandis que la même grandeur était représentée pour D_p par 1 mm. perpendiculairement au méridien magnétique et compté positivement vers l'Ouest. Dans la reproduction, ces figures originales ont été réduites dans la proportion de 48 à 22.

Dans la plupart des figures de la pl. II, les vecteurs des courants sont en traits pleins, lorsqu'ils représentent des courants dont la direction moyenne recoupe le méridien local (astronomique) au Nord de la station, tandis qu'ils sont en pointillé lorsque leur direction moyenne recoupe le méridien local au Sud. Une exception a été faite pour Christiania, où tous les vecteurs sont en traits pleins, les intensités verticales n'ayant à cette époque pas été observées, et pour Pawlowsk, où les vecteurs en traits pleins représentent des courants dont la trajectoire moyenne recoupe le parallèle de Pawlowsk à l'Ouest de cette localité, tandis que les vecteurs en pointillé se rapportent aux courants recoupaut ce même parallèle à l'Est de Pawlowsk.

Pour les années 1882 et 1883, j'ai construit des diagrammes spéciaux pour les mois d'hiver et pour les mois d'été. J'ai de plus fait pour ces mêmes années une distinction entre deux groupes de vecteurs. Les vecteurs du premier groupe, qui sur les figures ne portent aucune marque spéciale, ont été choisis pour les différentes localités en des moments exactement identiques à ceux où les perturbations les plus marquées se produisaient à Bossekop en 1882—1883. L'autre classe de vecteurs, marquée d'un cercle noir sous la pointe de la flèche, se rapporte à des moments différents pour des différents endroits, ceux où pour chaque endroit donné avaient lieu les perturbations les plus considérables, sans pour

cela que des perturbations spéciales se produisissent au même moment à Bossekop.

13. Le tableau 1 contient les données se rapportant à la fig. 1, pl. II.

Les tableaux 2 et 3 contiennent les données relatives aux vecteurs de la première classe (voir plus haut) pour les jours-termes de 1882—1883.

Au tableau 4 en trouvera les données pour les vecteurs de la 2me classe.

Tableau 1.

Haldde ~~Bossekop~~, hiver 1899—1900.

Jour		Temps de Greenwich		D_p. 10⁵	H_p. 10⁵
1899					
Décembre	26	5h	48m	+ 24	— 2
—	28	19	12	— 86	— 26
		22	17	— 72	— 64
—	30	19	21	— 96	+ 10
1900					
Janvier	4	18	26	— 70	+ 5
—	5	18	2	+ 48	+ 6
		15	12	+ 74	+ 19
		22	46	— 46	— 11
—	6	3	22	— 54	— 15
		19	41	— 56	+ 10
—	10	20	1	— 83	— 14
—	12	3	57	+ 24	0
—	17	14	0	— 64	+ 60
		22	27	— 48	— 24
—	19	23	56	— 52	— 39
—	22	19	31	— 136	+ 18
—	24	21	10	— 102	— 15
—	25	5	47	+ 32	— 5
		22	9	— 65	— 43
—	26	22	41	— 63	— 29
—	28	0	35	— 31	— 20
		17	42	— 115	+ 6
—	29	1	45	— 30	— 15
—	31	14	43	+ 40	+ 4
Février	2	12	30	+ 19	+ 2
		14	21	+ 8	+ 3
—	3	20	14	— 32	+ 5
—	5	11	20	+ 27	+ 11
		19	27	— 44	+ 8

Jour		Temps de Greenwich		D_p 10^5	H_p 10^5
1899					
—	11	2h	0m	+ 20	— 29
		3	45	— 50	— 12
		15	9	+ 35	+ 17
		21	6	— 66	— 22
		23	15	— 52	— 7
Février	20	18	12	+ 37	+ 26
—	23	23	30	— 46	— 26
—	24	0	30	— 32	— 43
		12	56	+ 21	+ 17
		19	56	— 21	+ 53
		22	6	— 64	— 82
—	25	1	17	— 48	— 75
Mars	6	19	10	— 53	+ 23
		23	45	— 46	— 32
—	7	19	8	+ 4	+ 24
		9	11	+ 10	— 15
		13	0	+ 11	— 8
		12	24	+ 16	— 8
—	8	11	4	+ 33	+ 9
		14	5	+ 54	+ 35
—	10	23	25	— 29	— 20
—	11	10	14	+ 8	— 8
		11	47	+ 16	— 6
—	12	15	20	24	28
—	14	0	24	— 112	— 165
—	15	0	6	— 74	— 67
		3	12	— 40	— 71
		10	56	+ 40	— 8
		11	48	+ 16	— 17
Février	11	23	15	— 52	— 8
—	23	23	40	— 56	— 37

Tab-

Mois

Jour		Temps de Göttingue	Bossekop $D_p.\ 10^5$	Bossekop $H_p.\ 10^5$	Jan Mayn $D_p.\ 10^5$	Jan Mayn $H_p.\ 10^5$
1882						
Octobre	15	1h 15	— 53	— 165	— 88	— 250
		15 35	+ 49	+ 210	+ 91	+ 75
Novembre	1	16 10	+ 18	+ 70	— 23	+ 115
		19 5	— 14	+ 105	+ 28	+ 30
		22 0	— 106	— 210	+ 40	— 25
—	15	2 45	— 99	— 550	+ 43	— 260
		6 55	— 246	— 200	— 125	— 125
		8 35	— 113	— 50	— 171	— 305
		18 45	+ 92	+ 310	— 71	+ 35
Décembre	1	3 15	— 109	— 70	— 40	— 45
		14 30	+ 7	+ 125	0	+ 25
		23 50	+ 14	— 275	+ 43	+ 20
—	15	20 15	— 7	+ 90	+ 11	+ 30
		22 10	— 113	— 105	+ 82	— 195
1883						
Janvier	2	2 15	— 32	— 110	+ 6	— 95
		18 25	— 74	+ 80	0	— 105
—	15	18 20	+ 7	+ 190	— 11	— 10
		20 30	+ 24	+ 160	+ 6	+ 5
		22 30	— 39	— 130	+ 60	— 10
Février	1	1 40	— 106	— 90	+ 42	— 400
		18 55	+ 63	— 290	+ 131	— 140
		22 15	— 99	— 700	+ 28	— 420
—	15	0 30	+ 4	+ 165	+ 40	— 220
Mars	1	19 40	— 21	— 380	— 26	— 430
		22 15	+ 106	— 120	— 17	0
		23 0	— 88	— 690	— 51	+ 10

leau 2.

d'hiver.

Fort Rae		Christiania		Pawlowsk	
D_p. 10⁵	H_p. 10⁵	D_p. 10⁵	H_p. 10⁵	D_p. 10⁵	H_p. 10⁵
+ 26	+ 100	— 19	+ 12	— 14	+ 23
— 170	— 370	+ 28	+ 7	+ 5	— 8
— 107	— 190	+ 19	— 11	+ 5	— 15
+ 24	0	+ 9	— 7	— 5	— 5
+ 13	+ 30	— 38	+ 6	— 33	+ 18
0	+ 350	+ 5	— 46	— 10	— 20
+ 49	+ 50	— 9	— 7	— 24	— 5
+ 201	— 300	— 51	— 71	— 62	— 60
— 49	+ 30	+ 19	+ 31	+ 14	+ 18
+ 15	+ 70	0	+ 2	— 2	— 3
— 89	— 60	+ 23	+ 5	+ 5	+ 5
+ 13	+ 80	— 19	— 7	— 48	— 10
+ 15	+ 20	+ 9	— 3	— 5	— 10
+ 41	— 100	— 33	— 14	— 48	— 8
0	0	+ 14	— 7		
+ 69	— 80	— 28	+ 3		
— 93	— 100	+ 19	— 7	— 2	— 10
+ 15	— 20	— 14	+ 7	— 10	+ 10
+ 35	— 30	— 19	0	— 14	0
+ 6	+ 50	— 28	+ 18	— 5	+ 25
— 232	— 270	+ 5	+ 46	— 43	— 35
— 95	— 230	— 103	— 6	— 124	— 30
0	0	— 28	+ 17	— 10	+ 15
— 153	— 80	— 66	+ 54	— 14	+ 45
— 13	+ 100	— 9	+ 11	0	0
— 22	+ 270	+ 9	— 32	+ 19	0

Tab-

Mois

		Bossekop		Jan Mayn	
Jour	Temps de Göttingue	$D_p.10^5$	$H_p.10^5$	$D_p.10^5$	$H_p.10^5$
1882					
Août 1	2^h 10	— 775	— 700		
	21 10	— 106	— 200		
— 15	1 5	— 74	— 195		
	16 10	— 42	+ 18		
	22 25	— 7	— 265		
Septembre 1	1 15	+ 29	— 45		
	20 0	— 4	+ 12		
— 15	1 30	— 7	— 70	— 34	— 150
	15 0	+ 7	+ 55	+ 28	+ 80
1883					
Avril 1	0 10	— 29	— 60	— 11	— 75
	16 40	— 4	+ 20	0	+ 80
— 15	16 25	— 4	+ 100	+ 9	+ 195
	23 45	— 42	— 175	+ 40	— 115
Mai 1	6 35	+ 42	— 25	— 17	— 175
	17 55	— 35	+ 124	+ 11	+ 110
	23 40	— 148	— 270	+ 57	+ 30
— 15	18 30	— 14	+ 85	+ 34	+ 80
	20 40	0	— 25	+ 85	+ 30
Juin 1	18 40	+ 42	+ 205	+ 17	+ 30
	22 45	— 56	— 35	+ 74	+ 10
Juillet 1	1 40	— 370	— 1230	+ 9	— 150
	2 20	+ 99	— 400	+ 3	+ 60
	12 10	0	+ 330	— 154	+ 265
	15 45	— 7	+ 360	+ 40	+ 165
	23 40	— 275	— 450	+ 43	— 70
— 15	17 25	+ 120	+ 310	+ 57	+ 10
	23 50	— 176	— 600	— 100	— 550
Août 1	2 30	— 528	— 440	— 20	— 115
	17 10	+ 113	+ 300	+ 26	+ 200
	22 15	— 198	— 430	+ 114	— 130
— 15	0 15	— 172	— 245		
	1 25	— 113	— 190		
	12 35	+ 56	+ 35		

leau 3.

d'été.

Fort Rae		Christiania		Pawlowsk	
D_p. 10^5	H_p. 10^5	D_p. 10^5	H_p. 10^5	D_p. 10^5	H_p. 10^5
		− 9	− 5		
		+ 14	+ 15		
		+ 14	+ 30		
		0	+ 14	− 5	+ 13
		+ 5	+ 17	− 5	+ 18
− 2	+ 20	+ 19	0	0	− 5
− 33	− 20	+ 23	+ 16	0	+ 15
− 6	− 10	− 14	+ 12	− 10	+ 13
− 30	− 50	+ 5	0	− 5	+ 3
− 112	− 160	+ 14	+ 24	− 5	+ 23
+ 22	0	− 5	+ 28	0	+ 15
+ 45	+ 30	+ 5	+ 6	+ 10	− 10
− 93	− 20	− 9	+ 26	− 14	+ 20
0	+ 190	− 14	− 7	− 14	+ 3
− 56	0	− 19	+ 31	− 24	+ 40
− 17	+ 10	0	+ 21	+ 2	+ 20
− 37	− 70	+ 9	+ 36	− 5	+ 15
0	0	− 14	+ 9	− 19	+ 3
+ 100	− 70	− 84	− 70	− 67	+ 30
+ 205	− 80	− 56	− 50	− 24	− 10
− 4	+ 50	+ 23	+ 10	+ 38	+ 30
− 129	− 100	+ 23	+ 37	+ 24	+ 25
− 45	+ 250	+ 9	− 23	+ 10	− 3
− 446	− 540	+ 14	+ 103	+ 19	+ 70
− 82	+ 300	+ 9	− 13	+ 19	− 20
− 4	+ 50	− 84	− 57	− 67	− 5
− 346	− 330	0	+ 35	− 2	+ 10
− 58	+ 180	− 56	+ 15	− 19	+ 25
+ 8	+ 170	− 19	+ 7	− 24	+ 5
+ 47	+ 280	+ 5	− 9	− 10	− 8
− 30	0	+ 47	+ 14	− 53	+ 25

Tableau 4.

Jan Mayn

Hiver

Jour		Temps de Göttingue		D_p. 10[5]	H_p. 10[5]
1883					
Janvier	15	21h	45	— 88	— 60
Février	1	21	55	+154	—110
Mars	1	19	20	—682	—240
«	15	5	20	— 54	—140

Eté

Jour		Temps de Göttingue		D_p. 10[5]	H_p. 10[5]
1883					
Mai	15	6h	20	— 68	—125
Juin	1	4	0	— 65	—105
Juillet	1	0	50	—221	—720
		6	35	—125	—255
Août	1	13	20	+ 48	+280
		17	35	+ 63	+165

Fort Rae

Hiver

Jour		Temps de Göttingue		D_p. 10[5]	H_p. 10[5]
1882					
Octobre	15	8h	20	—138	—480
		12	10	—206	—430
Novembre	1	15	36	—184	—290
«	15	4	0	— 73	+340
		14	0	—190	— 70
Décembre	1	6	48	+ 6	—100
1883					
Janvier	2	14	44	—123	—280
«	15	13	55	—173	—230
Mars	1	13	50	—404	—440
		6	35	+187	+230

Eté

Jour		Temps de Göttingue		D_p. 10[5]	H_p. 10[5]
1883					
Avril	1	14h	0	—112	—120
«	15	10	45	— 39	—110
Mai	15	8	40	+ 39	—260
Juin	1	12	35	— 78	—310
Juillet	1	1	27	+120	+300

Christiania

Hiver

Jour		Temps de Göttingue	D_p. 10^5	H_p. 10^5
1883				
Janvier	15	21h 45	— 28	+ 21
Février	1	21 55	—143	— 32
Mars	1	19 20	—126	+ 46
«	15	5 20	+ 9	— 6

Eté

Jour		Temps de Göttingue	D_p. 10^5	H_p. 10^5
1883				
Mai	15	6h 20	— 23	— 4
Juin	1	4 0	— 19	— 17
Juillet	1	0 50	— 38	— 50
		6 35	— 14	— 25
Août	1	13 20	+ 47	+ 43
		17 35	+ 19	+ 95

Pawlowsk

Hiver

Jour		Temps de Göttingue	D_p. 10^5	H_p. 10^5
1882				
Octobre	15	8h 20	— 19	— 45
1883				
Mars	1	15 20	— 38	+ 60

Eté

Jour		Temps de Göttingue	D_p. 10^5	H_p. 10^5
1883				
Juillet	15	15h 35	+ 43	+ 85

14. Passant à la discussion de nos résultats, nous allons examiner d'abord les figures se rapportant à Bossekop, Jan Mayn et Fort Rae pour 1882—1883.

On voit immédiatement par ces figures qu'en général, dans ces localités, il y a dans le cours d'une même journée deux directions de courant bien marquées.

Pour Bossekop, les courants les plus forts sont dirigés vers le Sud-Ouest pendant la première partie de la nuit, et à ce qu'il semble plus vers le Sud et plus tard dans la nuit en été qu'en hiver. Un autre courant, dirigé vers l'Est-Nord-Est se manifeste dans l'après-midi, mais de meilleure heure en été qu'en hiver. Presque tous les courants passent au Nord de Bossekop; ce n'est qu'assez tard en été que la ligne médiane du courant recoupe le méridien de Bossekop au Sud de cette localité.

Si l'on examine les planches relatives à Jan Mayn, on y retrouve des directions de courant analogues à celles de Bossekop, surtout pendant les mois d'été. Il y a pendant la nuit un courant dirigé vers le Sud-Ouest, un peu plus tard qu'à Bossekop, mais avec des vecteurs de courant plus dispersés — et un courant vers le Nord-Est dans le cours de l'après-midi.

Ce qui est surtout intéressant et important ici, c'est qu'on voit les mêmes courants qui passaient au Nord de Bossekop passer presque tous au Sud de Jan Mayn. C'est ce qui se manifeste clairement sur les courbes originales des intensités verticales pour les jours-termes à Bossekop et à Jan Mayn. On voit que dans ces deux localités les variations vont très-souvent de conserve, mais en sens exactement inverse.

Ces faits prouvent deux choses :

1°. Que tous les courants dont il s'agit circulent bien dans l'atmosphère, ainsi que nous le prévoyions. Si en effet on les supposait se propageant dans le sol, la même ligne médiane de courant devrait aller simultanément au Sud de Bossekop et au Nord de Jan Mayn avec la même direction que précédemment, mais à cela près que dans chaque cas, le courant irait dans un sens opposé à celui qu'il avait précédemment. Mais cela est impossible, étant donnée la situation géographique relative de Bossekop et de Jan Mayn. Notre raisonnement ne tient nul compte de l'hypothèse d'ailleurs fort invraisemblable de deux courants de même direction et à variations semblables et synchrones, l'un au Sud de Bossekop, l'autre au Nord de Jan Mayn.

2°. Ensuite, que dans les régions polaires les courants en question sont nettement délimités et concentrés. Il est probable que la largeur de la partie prédominante du courant n'a jamais dépassé beaucoup 500 kilomètres pour les jours-termes en question de 1882—1883. Si l'on admet que les courants se meuvent dans les mêmes couches atmosphériques où on observe les aurores boréales les plus élevées, soit à 200 kilomètres environ, on se fera ainsi provisoirement une idée approchée de leur répartition.

Nous pouvons aussi nous former une idée de l'intensité de ces courants au cours de perturbations considérables. On peut en effet s'attacher à des cas où les perturbations de l'intensité verticale sont égales de grandeur, mais de sens inverse pour les stations de Bossekop et de Jan Mayn. En pareil cas, il est rationnel d'admettre que le courant moyen à passé entre les deux localités à égale distance de chacune d'elles, à condition toutefois que les perturbations correspondantes dans le plan horizontal indiquent des directions de courant permettant pareille hypothèse. Cette

dernière condition a toujours été remplie sans plus dans les cas spéciaux examinés par moi.

Si maintenant l'on suppose tout le courant concentré suivant sa ligne médiane, le champ magnétique entourant ce courant sera déterminé approximativement par la formule

$$F = 0,1 \cdot \frac{2i}{a}$$

où i est l'intensité du courant en ampères et a la distance en centimètres à la ligne médiane. Si p. ex. on prend un cas datant du 2 janvier 1883 à $2^h 20^m$, heure de Göttingue, on trouve pour les deux stations une perturbation de l'intensité verticale égale

à environ 0.0015 C. G. S.

Les perturbations des éléments horizontaux indiquent les directions de courants rapportées sur la fig. 4 ci-jointe.

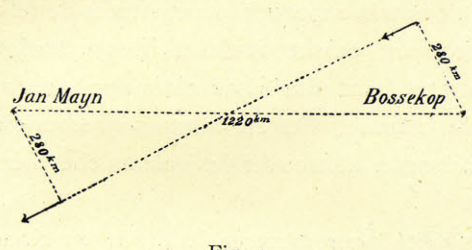


Fig. 4.

Comme nous l'avons déjà dit, nous admettons provisoirement que la hauteur du courant au-dessus de l'horizon est d'environ 200 kilom.

Nous négligeons partout la courbure de la Terre, attendu qu'elle ne peut ici affecter le résultat que de 1 pour cent, tandis que dans les cas mentionnés subséquemment les erreurs ne dépassent pas 2 pour cent.

En exécutant les calculs, on trouve ici

$$i = 317\,000 \text{ ampères.}$$

Un calcul analogue donnera pour la date

15 octobre 1882	$1^h 45^m$	heure de Göttingue,	$i =$	556 000 ampères
1 février 1883	$22^h\ 5^m$	—«—		350 000 —
15 juillet 1883	$23^h 35^m$	—«—		520 000 —

Nous pouvons maintenant nous faire une idée sur le point de savoir si la hauteur de 200 kilom. est tant soit peu exacte, en nous rendant compte de l'intensité que devrait avoir un courant perturbateur passant droit au-dessus de Bossekop un jour où, aux autres stations, les perturbations ont été de même ordre qu'aux jours mentionnés ci-dessus.

On peut admettre que la ligne médiane du courant passe justement au-dessus de Bossekop, lorsque la perturbation de l'intensité verticale est négligeable, tandis que les perturbations de l'intensité horizontale sont exceptionnellement grandes.

En faisant ainsi les calculs, avec une altitude de 200 kilomètres pour le courant, on trouve

au 15 novembre 1882 1^h45^m temps de Göttingue i = 497 000 ampères
1 juillet 1883 1^h35^m 983 000 —

Nous ferons remarquer qu'en réalité l'intensité a dû être notablement plus grande, les courants ayant probablement été répartis sur toute une ceinture assez large, s'étendant de part et d'autre de Bossekop.

Nous voyons donc que les valeurs de l'intensité i que nous venons de calculer en dernier lieu sont notablement plus grandes que celles trouvées par l'autre méthode. Il est donc probable que l'altitude admise, soit 200 kilom., a été prise trop élevée, et il se peut que 100 kilom. soit une valeur moyenne répondant mieux à la réalité.

On trouverait certainement pour l'intensité du courant et son altitude, des valeurs bien plus exactes qu'ici, si l'on avait eu, pour y enregistrer les perturbations, trois stations très-rapprochées, et situées de telle sorte que la ligne médiane du courant passàt au-dessus de la station intermédiaire, les deux autres stations étant situées de côtés opposés par rapport à la zone couverte par le courant. On eût alors pu recourir à une méthode de calcul plus satisfaisante, et trouver les valeurs cherchées par approximations successives.

Il y a encore une autre possibilité pour mesurer l'altitude où circulent les courants en question. Comme on le sait, on a constaté dans les régions polaires la formation de nuages allongés, lumineux pendant la nuit. Ces nuages sont probablement produits par les courants qui nous occupent, et dans ce cas, on pourrait, en mesurant leur altitude, en tirer des conclusions quant à l'altitude minimum du courant lui-même au-dessus de la surface de la Terre. —

Prenons maintenant, à titre comparatif, les observations du Fort Rae. Ici l'on voit par les figures que le courant le plus prononcé est dirigé vers l'Ouest entre 14 et 15 heures, temps de Greenwich.

Dans la nuit, on trouve d'ailleurs presque toujours un autre courant dirigé vers le Sud-Est.

Il semble qu'au Fort Rae les courants aient tourné d'environ 100° dans le sens opposé à celui des aiguilles d'une montre, relativement aux courants simultanés de Bossekop et de Jan Mayn Presque tous les courants du matin ont passé au Sud du Fort Rae, tandis que, surtout en hiver, plusieurs de ceux de la nuit ont passé au Nord de la même station. Il convient de remarquer que la direction des courants en question semble partout, à Bossekop, à Jan Mayn et à Fort Rae, coincider à peu près

avec celle de la ceinture aurorale qui, comme on le sait, passe assez près de ces trois stations.

En outre, si nous nous rappelons le mode de construction des figures que nous discutons successivement ici, il en résultera déjà clairement que les courants en question ont une période diurne; nous verrons qu'ils tournent autour de la Terre en 24 heures dans le sens apparent du Soleil, quoique leur vitesse de rotation varie certainement aux différentes heures de la journée.

Si maintenant l'on considère les figures 8, 9, 10 et 11 de la planche II, qui représentent les courants les plus essentiels pour Christiania et Pawlowsk pour les jours-termes en question, on retrouve là aussi, pour les mois d'été surtout, des courants très-caractéristiques, et correspondant sans doute aux courants dont nous venons de parler.

Nous aurons plus tard l'occasion de discuter encore ces figures.

15. Revenons enfin à nos résultats pour ~~Bossekop~~ Haldde en 1899—1900. Pour poursuivre de plus près les courants dont ils nous fournissent la notion, courants représentés par la fig. 1, pl. II, j'ai cherché à emprunter les matériaux de comparaison dont j'avais besoin au plus grand nombre possible d'observatoires magnétiques, disséminés sur une grande partie de l'hémisphère boréal.

A Potsdam déjà, lorsque je pus comparer tous les matériaux enregistrés par nous à ceux réunis simultanément à Potsdam, je remarquai que sur 16 jours des 3 mois considérés, nos courbes et celles relevées à Potsdam contenaient un grand nombre de parties tout à fait concordantes. Je fis alors choix de 6 de ces jours, pour chercher à obtenir les photogrammes correspondant à ces jours pour un aussi grand nombre d'endroits que possible.

Comme je l'ai déjà dit, j'ai, grâce à la grande bienveillance des directeurs des observatoires magnétiques de Pawlowsk, Copenhague, Potsdam, Paris, Greenwich et Toronto, réussi à obtenir des photogrammes provenant de toutes ces localités.

Pour 5 de ces jours, les 4—5 et 11—12 février, les 3—4, 13—14 et 15—16 mars, les courbes correspondantes sont reproduites sur les planches III à VII, après avoir été, au moyen d'un pantographe, transformées de façon à pouvoir être comparées directement. Les parties des courbes reproduites sont comprises entre midi, temps de Greenwich, d'un jour, à 8 heures du matin le lendemain.

A Haldde, nous n'avons en général pour les jours en question que l'intensité verticale, attendu que les jours où des tempêtes magnétiques envahissaient de vastes portions du globe, les forces perturbatrices H_p et

D_p étaient trop-grandes à Haldde pour que pour les raisons déjà indiquées, leur enregistrement pût réussir complètement.

L'intensité des perturbations dans les différentes localités peut être déduite des courbes ici reproduites en connexion avec le tableau ci-dessous, qui indique les valeurs des éléments magnétiques en C. G. S. répondant à chaque millimètre des ordonnées des courbes.

	H.	*D.*	*V.*
Haldde	15.10^{-6}	0.'93	245.10^{-6}
Pawlowsk	75.10^{-6}	1.'43	84.10^{-6}
Copenhague	143.10^{-6}	2.'14	
Potsdam	66.10^{-6}	2.'04	59.10^{-6}
Paris	70.10^{-6}	1.'45	
Greenwich	39.10^{-6}	0.'69	
Toronto	69.10^{-6}	2.'25	

16. Discutons maintenant de plus près les photogrammes relatifs aux sept stations mentionnées précédemment, et reproduits par des méthodes mécaniques aux planches III à VII.

On remarque immédiatement qu'il y a tout spécialement vers l'heure 21 (temps de Greenwich) un déplacement relatif des perturbations des

Tab-

Paris			Greenwich			Toronto		
Temps de Gr.	$D_p.10^5$	$H_p.10^5$	Temps de Gr.	$D_p.10^5$	$H_p.10^5$	Temps de Gr.	$D_p.10^5$	$H_p.10^5$
16h 6	− 17	− 42	16h 13	− 13	− 32	16h 6	+ 30	− 30
19 12	− 83	+ 21	19 10	− 85	+ 14	19 0	0	− 46
22 0	− 58	+ 49	22 9	− 59	+ 58	22 18	− 24	− 17
20 54	− 42	+ 14	20 54	− 40	+ 14	20 54	0	− 13
23 51	− 12	+ 11	23 55	− 13	+ 10			
19 39	− 13	+ 7	19 42	− 13	+ 3			
21 0	− 37	+ 32	21 0	− 35	+ 26	21 17	− 12	− 11
19 40	− 54	− 32	19 42	− 48	− 35			
22 12	− 33	+ 7	22 17	− 40	0			
19 39	− 12	+ 4	19 39	− 11	0			
			22 39	− 15	0			
1 39	− 25	+ 17	1 27	− 23	+ 17	1 30	− 12	− 23
0 17	+ 29	+ 56	0 13	+ 29	+ 55	0 30	− 48	− 15
21 36	+ 25	+ 91						
21 51	− 50	+ 63						
22 3	+ 17	+ 84						

éléments magnétiques correspondants des stations de l'Est à celles de l'Ouest. En mesurant sur les photogrammes le temps d'apparition dans les différentes localités du moment initial des perturbations un peu brusques, ou d'autres variations propres aux mêmes fins, on peut calculer sans peine la vitesse propre avec laquelle la cause des perturbations se déplace vers l'Ouest de Pawlowsk ou Potsdam à Greenwich ou Toronto.

Par un certain nombre de pareilles mesures faites sur les planches originales, j'ai trouvé que cette vitesse de translation est d'environ 100 kilom. par minute pour les grandes perturbations, tandis que pour les petites, la vitesse est moindre.

Il semble toutefois que cette translation des perturbations ne soit pas uniforme aux différentes heures de la journée; elle semble surtout différer beaucoup pour le temps compris entre 8 et 10 heures (temps de Greenwich).

Malheureusement, les parties de nos photogrammes qui présentent le plus d'intérêt à cet égard ne sont pas reproduites sur nos planches, attendu que, pour les jours correspondants, il n'y avait justement nulle part de perturbations bien marquées, et que les planches étaient déjà dessinées lorsque l'anomalie en question fut observée pour la première fois.

leau 5.

Jour	Pawlowsk			Copenhague			Potsdam		
	Temps de Gr.	$D_p.10^5$	$H_p.10^5$	Temps de Gr.	$D_p.10^5$	$H_p.10^5$	Tems de Gr.	$D_p.10^5$	$H_p.10^5$
Février 4	15h 56	— 50	— 35	16h 4	— 36	— 38	16h 4	— 22	— 39
	18 48	—137	+ 75	18 56	—136	+ 29	19 0	—120	+ 36
	21 44	— 9	+ 75	21 48	— 72	+ 77	21 54	— 71	+ 78
« 11	20 40	— 21	+ 50	20 40	— 54	+ 48	20 43	— 46	+ 42
« 26	23 52	+ 12	+ 13	23 48	— 7	+ 19	23 48	— 8	+ 16
Mars 3	19 45	— 14	+ 20	19 40	— 18	+ 19	19 39	— 19	+ 13
	21 0	+ 16	+ 30	20 54	— 36	+ 43	21 0	— 33	+ 45
« 13	19 36	— 91	0	19 36	— 72	— 19	19 39	— 76	— 20
	22 14	—119	+100	22 16	— 86	+ 38	22 18	— 71	— 39
« 15	19 36	+ 9	+ 18	19 36	— 24	+ 19	19 39	— 14	+ 15
	22 34	— 5	+ 15	22 34	— 15	+ 14	22 39	— 8	+ 10
« 16	1 26	0	+ 23	1 26	— 15	+ 29	1 34	— 11	+ 26
« 14	0 18	+ 32	— 10	0 0	+ 57	+ 19	0 6	+ 38	+ 26
Février 11							23 15	— 11	0
« 23							23 40	— 22	+ 10
Mars 13	21 32	— 27	— 75	21 32	+120	0	21 36	+ 66	+ 20
	21 48	+ 60	+ 25	21 52	— 36	+115	21 54	— 33	+111
	22 0	+137	— 95	22 0	+106	0	22 3	+ 49	+ 20

Les matériaux dont je dispose actuellement ne m'ont pas permis de me faire une idée sûre de la façon dont ce phénomène se manifeste aux heures matinales : il sera donc d'autant plus nécessaire d'en faire l'objet de recherches plus précises.

17. Nous allons maintenant nous occuper de tracer les diagrammes des vecteurs de courants, pareils à ceux de la pl. II, en nous servant pour cela des matériaux précieux mis à notre disposition par les 6 observatoires magnétiques dont nous avons donné la liste.

En mesurant sur les photogrammes originaux les perturbations les plus saillantes, nous avons d'abord calculé les différentes valeurs des composantes H_p et D_p en ces 6 localités, valeurs inscrites au tableau 5.

18. Sur la planche VIII, nous avons en nous basant sur les chiffres du tableau précédent, inscrit les vecteurs de courants relatifs aux observatoires de Pawlowsk, Copenhague, Potsdam, Paris, Greenwich et Toronto.

Ici, l'échelle est 2.93 fois plus grande que l'unité de la pl. II.

Mais nous n'y avons pas fait entrer les courants du 13—14 mars, les courants observés à cette date ayant eu un caractère exceptionnellement versatile, avec courants locaux d'apparition assez rare.

C'est ainsi que le 13, un peu après midi, un fort courant dirigé vers le Nord-Ouest semble avoir passé à l'Est de Toronto, et le même courant a semblé se retrouver à l'Est de Pawlowsk, mais sur ce point, il était dirigé vers le Sud-Est. Ce courant a évidemment passé entre Bossekop et Pawlowsk, car les perturbations dans l'intensité verticale sont en sens contraire pour ces deux stations; cependant nous ne possédons pas de matériaux suffisants pour former un jugement bien fondé sur la trajectoire exacte du courant.

Plus tard dans la nuit, on constata aussi des directions de courants ne concordant pas avec les directions normales. On voit p. ex. à la fig. 7, même planche, des directions de courants correspondant à la dernière perturbation qui fit son apparition avant que la tranquillité normale se trouvât partout rétablie.

Revenons cependant aux figures 1 à 6, auxquelles se rattachent les faits les plus intéressants. On peut en tirer immédiatement deux conclusions importantes.

1°. Chaque diagramme pris isolément montre que, tels qu'ils se manifestent en général, les courants relevés de bonne heure ont tourné dans le sens des aiguilles d'une montre, si on les compare à ceux qui se produisent à une heure ultérieure, en-dedans des limites indiquées de $\pm$ 5 heures aux environs de 21 heures.

2°. Chaque groupe de vecteurs correspondants pour les 6 stations montre que les courants tournent dans le sens des aiguilles d'une montre lorsqu'on passe d'une station orientale à une station occidentale. Cela s'applique en tout cas aux heures voisines de celles considérées ici.

Nous pouvons maintenant rapporter sur une carte les lignes des courants en nous basant sur nos résultats. Mais comme à Bossekop nous n'avons pas les courants directement correspondants à ceux représentés par la pl. VIII, nous devrons extraire leur direction moyenne correspondante de la fig. 1, pl. II, ce que nous pouvons faire sans risquer de commettre d'erreur sensible.

Nous pouvons d'ailleurs aussi, pour confirmer la direction de courant ainsi trouvée, faire entrer en ligne de compte les quelques cas que nous possédons de directions de courants directement correspondantes pour Bossekop et Potsdam, et qui sont figurées fig. 8 pl. VIII.

A la pl. IX, nos lignes de courants sont relevées pour l'heure 24 — minuit, — temps de Greenwich.

Les courants cheminent d'abord en faisceau serré vers le Sud-Ouest en côtoyant la Norvège du Nord; après cela ils se dispersent fortement, les lignes de courants les plus orientales déviant énergiquement vers l'Est, et les lignes occidentales moins fortement vers l'Ouest; il semble bien qu'il y ait tendance à former un tourbillon oriental et un tourbillon occidental, l'un, vu d'en haut, avec des directions de courants se déplaçant dans le sens opposé à celui des aiguilles d'une montre, l'autre dans le sens même de ce mouvement.

Le fait que les courants se dispersent fortement quand, partant des régions polaires, on se dirige vers le Sud, est complètement d'accord avec la diminution que l'on constate dans les perturbations magnétiques des trois éléments dans les régions plus méridionales, et surtout avec ce fait que des perturbations considérables de l'intensité verticale y deviennent relativement rares.

Ce qui jette bien de la lumière sur ces phénomènes, c'est la remarque que le rapport entre les grandeurs des perturbations dans l'intensité verticale de Haldde et de Potsdam est parfois dix fois plus grande que le rapport entre les variations correspondantes des éléments horizontaux en ces deux localités. Ceci doit pouvoir s'expliquer en ce que les courants se manifestant à Potsdam font toujours partie d'une zône fort large embrassant souvent toute la partie moyenne de l'Europe, et que par suite, il ne peut presque jamais s'y former de courants fortement concentrés sur un des côtés seulement de l'observatoire de Potsdam, ce qui serait nécessaire pour y produire des fortes perturbations dans l'intensité verticale.

Les courants doivent en général passer au-dessus de Potsdam et le signe de la déviation de la balance sera positif ou négatif suivant que Potsdam est situé d'un côté ou de l'autre de la ligne médiane de la zône des courants.

Avec cette représentation des courants perturbateurs que l'on trouve aux figures de la pl. IX, on saisit aisément la raison des deux observations importantes faites sur la pl. VIII:

a) Les diagrammes isolés répondant à un quelconque des 6 observatoires montrent que les courants qui se trouvent en avance ont en général tourné en direction dans le sens des aiguilles d'une montre, relativement aux courants apparaissant plus tard; cela résulte de ce que la Terre tourne tandis que le faisceau de lignes de courants faisant l'objet du diagramme est considéré comme conservant à peu près sa place dans l'espace. Par suite chacune des stations passe en premier lieu les lignes de courants déviées vers l'Ouest relativement au méridien, et en dernier lieu celles qui sont déviées vers l'Est.

b) Les groupes de vecteurs se correspondant mutuellement pour les 6 stations montrent en effet que des stations orientales aux stations occidentales, les courants tournent dans le sens des aiguilles d'une montre en pleine conformité avec ce que nous avons représenté pl. IX. Il est intéressant de remarquer à l'aide de la pl. VIII que les courants les plus occidentaux vers 16 heures se sont manifestés aux latitudes les plus basses dans l'Atlantique entre les méridiens de Greenwich et Toronto, et la courbure des lignes semble indiquer clairement qu'il existe des courants en tourbillon ainsi que je l'ai indiqué plus haut.

19. Toujours d'accord avec notre conception de l'origine des perturbations magnétiques, nous allons chercher l'explication du phénomène mentionné au § 16.

Nous avons, surtout vers 21 heures, temps de Greenwich, trouvé un déplacement assez sensible des perturbations qui se correspondent dans les différentes localités, ces perturbations faisant leur apparition de meilleure heure dans les stations situées le plus à l'Est que dans celles situées plus à l'Ouest, la vitesse avec laquelle la cause des perturbations semble se déplacer d'Est en Ouest étant d'environ 100 kilom. par minute.

La maniére la plus simple d'expliqner ce fait semble être d'admettre que tout le faisceau de courants rayonnants oscille d'Est en Ouest chaque fois que se manifeste une recrudescence du courant. Ceci semble aussi prouvé directement par la rotation des vecteurs de courant pendant une pareille recrudescence. Voir p. ex. à la pl. III les courbes de Greenwich.

La courbe H pour environ 19 heures montre clairement, de concert avec la courbe D, comment les vecteurs de courant, lors de la recrudescence en question, avaient d'abord une direction à peu près Sud-Ouest, pour passer plus tard droit au Sud, puis à peu près vers le Sud-Est.

Une rotation analogue plus ou moins forte d'Ouest en Est se retrouve partout chez les vecteurs de courant des 6 stations, au cours d'une même recrudescence ou de secousses analogues. Cette rotation correspond précisément avec la rotation vers l'Ouest du faisceau de lignes de courants pendant la recrudescence. Une raison physique de ces oscillations ne parait pas s'imposer avec évidence. L'ondulation ne semble pas pouvoir être attribuée avec certitude à l'action réciproque du magnétisme terrestre sur le courant; car dans ce cas il semble à première vue que le courant devrait s'être déplacé dans le sens contraire.

Toutefois la force avec laquelle, dans les régions les plus septentrionales, le magnétisme terrestre pousse vers le Sud-Est les éléments de courants de direction Sud-Ouest, doit être plus considérable que la force correspondante dans des régions plus méridionales, tant en raison de la plus grande concentration du courant aux hautes latitudes, que de la valeur plus grande de la composante verticale du magnétisme terrestre.

N'est-il pas possible qu'il en résulte une conversion vers l'Ouest de l'ensemble du courant aux latitudes moyennes, comme j'en ai constaté à l'aide des matériaux fournis par les observatoires magnétiques mentionnées précédemment?

20. Sur la pl. IX, les lignes de courant sont représentées pour la partie la mieux étudiée de nos courants dans l'atmosphère. Il va sans dire qu'il y a quelque-chose de très-séduisant à chercher à deviner leur marche ultérieure. Et ici l'on n'est nullement privé de guide : notre diagramme de Haldde pour l'année 1899—1900 nous donne au contraire d'excellentes indications.

On voit p. ex. que les courants de retour dirigés vers le Nord passent à Bossekop d'environ 3 heures du matin à 18 heures. Ces courants sont faibles, il est vrai, mais les photogrammes originaux montrent qu'ils sont de bien plus longue durée que les courants dirigés vers le Sud au commencement de la nuit. Et ceci veut dire tout bonnement que les courants septentrionaux des heures matinales sont disséminés dans une zône très-large.

Les photogrammes de l'intensité verticale montrent également que les courants doivent être épars, attendu qu'on ne trouve presque jamais vers cette heure d'écart considérable de la balance. Le courant doit donc en général passer simultanément des deux côtés du lieu d'observation. Les

vecteurs de courant correspondants sont par suite tracés en trait plein, attendu qu'on n'a pu indiquer de quel côté de Bossekop passait la ligne médiane du courant.

Ces vecteurs pour les courants faisant retour aux régions polaires ont en général, lorsqu'ils passent à Bossekop, une direction Nord-Ouest aux premières heures du matin, mais plus tard dans la journée une direction décidément Nord-Est.

C'est d'après ces indications que j'ai esquissé les lignes de courant sur la carte reproduite par la pl. X.

Je considère comme bien établie, dans ses traits principaux, la première partie de ces lignes de courant, celle qui est déjà représentée par la pl. IX; à la façon dont le reste est rapporté, chacun comprend que la prolongation du tracé des lignes de courant est une grossière approximation. Lorsqu'un grand nombre d'observatoires se seront mis d'accord pour construire un diagramme pareil à celui que j'ai dessiné pour Bossekop, alors seulement on pourra tracer une carte relativement exacte. Le mieux serait d'instituer des enregistrements simultanés en diverses stations polaires et dans le plus grand nombre possible d'autres stations.

C'est ici l'endroit de faire une remarque sur tous les diagrammes de la pl. II, déjà souvent mentionnés. A l'exception de la fig. 1, ils sont basés sur les perturbations les plus considérables observées en 1882—83. Dans la fig. 1, au contraire, on n'a pas tenu compte des plus grosses perturbations, mais, parmi les plus nettement caractérisées, de celles seulement de moyenne et petite amplitude : par suite, l'échelle de cette figure a été prise 5 fois plus grande que pour les stations polaires de 1882—83. Si dans ces dernières, on avait tenu compte aussi des perturbations moindres, on serait peut-être arrivé ainsi pour les courants faisant retour vers les régions polaires à une vue d'ensemble plus complète qu'on ne l'a fait précédemment.

21. De ses études sur les coefficients harmoniques des composantes magnétiques, Schuster[1] a tiré la conséquence qu'il doit y avoir sur chaque hémisphère un centre positif et un centre négatif d'attraction magnétique, produits par des courants électriques dans l'atmosphère, et semblant graviter autour de la Terre avec le Soleil.

Ces faits apparaissent bien clairement dans un mémoire plus récent de Betzold[2], où les lignes équipotentielles correspondant à la variation quotidienne sont rapportées sur une carte de la Terre suivant la projection de Mercator.

---

[1] A. Schuster, Phil. Trans. Vol. 180 A, p. 467—518, Londres 1889.
W. v. Betzold, Sitzungsberichte der Ak. d. W. zu Berlin, année 1897, p. 414—449.

Ce système de lignes équipotentielles se laisse expliquer en admettant qu'il circule dans les couches supérieures de l'atmosphère des courants galvaniques qui, dans l'hémisphère boréal et vues d'en haut, se meuvent la nuit, dans le sens des aiguilles d'une montre, et, le jour, dans le sens opposé, et inversement pour l'hémisphère austral. Dans sa conférence du 19 décembre 1899 devant la Société Electrotechnique[1] de Berlin, M. von Betzold représente la Terre comme étant, dans les couches supérieures de l'atmosphère, encerclée dans son mouvement diurne par 4 pôles magnétiques placés symétriquement par rapport à l'équateur vers le 40ème degré de latitude. De ces pôles il faut s'en imaginer deux du côté du jour et deux du côté de la nuit, les pôles du côté jour étant de même nom que le pôle magnétique de l'hémisphère considéré, ceux du côté nuit de nom contraire. De plus, l'action exercée sur le côté jour est plus concentrée que celle exercée sur le côté nuit, c'est-à-dire que, si elle est due à des courants, ceux du jour sont plus forts et plus concentrés dans un espace plus restreint. En même temps la force de ces pôles, ou des systèmes de courants qui les remplacent, varie avec la saison. Ils atteignent dans notre hémisphère leur force maximum en juin, leur force minimum en décembre; le contraire a lieu pour l'hémisphère austral. Enfin il convient de mentionner que les pôles du côté jour passent au méridien environ cinq quarts-d'heure avant la culmination du Soleil, c'est-à-dire qu'ils sont en avance sur celui-ci.

Les calculs de Schuster ne sont pas valables pour les régions polaires. En outre il faut observer que la carte dressée par Betzold d'après les chiffres de Schuster représente uniquement la situation telle qu'elle était en 1870. Et la carte ne peut pas, même dans ses détails les plus grossiers, être considérée comme valable pour toutes les années; elle devra montrer en réalité des différences considérables, surtout pendant les années extrêmes de la période des taches du Soleil.

Si l'on faisait pour l'année 1899—1900 des calculs analogues à ceux faits par Schuster pour 1870, on tirerait au clair si les courants de Schuster-Betzold peuvent être réellement considérés comme étant en rapport intime avec les tourbillons les plus intérieurs vers les basses latitudes, du grand système de courants indiqué au § 20.

La comparaison des diagrammes de vecteurs de Bossekop pour 1899—1900 (fig. 1, pl. II) avec ceux des vecteurs pour la même localité en 1882—83 (fig. 2 et 3, même planche) montre que les tourbillons en question peuvent changer extraordinairement de place d'une année à l'autre.

---

[1] Elektrotechnische Zeitschrift 1900, livraison 8.

Nous avons donc ici devant nous les courants tels qu'ils se comportaient au voisinage d'un minimum des taches du Soleil et au voisinage d'un maximum.

Si nous cherchons à comparer tous les diagrammes des directions de courants en différents endroits pour 1882—83, diagrammes construits pl. II, de la même façon dont nous avons discuté les diagrammes pour 1899—1900, pl. VIII, nous ne réussirons pourtant pas à constater d'une façon certaine quelle a été la position des tourbillons de courants pendant la période 1882—1883.

Il faudrait nécessairement, pour cela, se procurer des diagrammes correspondants pour un plus grand nombre de stations que nous n'en possédons.

Il semble toutefois résulter des matériaux dont nous disposons que, pendant la période en question, les deux tourbillons de courants, à supposer qu'ils existent, ont été plus éloignés l'un de l'autre qu'en 1899—1900 du côté où dans les deux tourbillons les courants sont dirigés vers le Sud, tandis qu'ils ont été relativement plus rapproches du côté où ces courants allaient vers le Nord.

De plus les »centres« des tourbillons doivent avoir cheminé à des latitudes très-méridionales, de telle sorte que le Fort Rae lui-même s'est trouvé fort au Nord de ces »centres«. Celui des tourbillons dont le mouvement est opposé à celui des aiguilles d'une montre doit avoir été situé le plus au Sud.

Il serait du plus haut intérêt de rattacher les uns aux autres des diagrammes de vecteurs de courants analogues aux miens et construits sur le plus grand nombre possible de points différents, et séparément pour le semestre d'été et celui d'hiver. Si l'on voulait bien les construire pour l'année 1899—1900 pour toute la durée de la journée et me les envoyer, je me chargerais avec plaisir de dresser une carte bien autrement exacte et complète de la marche des courants dans l'atmosphère que je n'ai pu le faire jusqu'ici à l'aide des matériaux malheureusement insuffisants que j'ai eus actuellement à ma disposition.

Esperons que l'année 1902 fera époque pour l'extension de nos connaissances relatives à ces courants, plusieurs expéditions vers le pôle austral devant se livrer alors à l'étude des phénomènes magnétiques dans les régions antarctiques, en même temps que des enregistrements exacts auront lieu dans un grand nombre d'autres observatoires.

Il est à désirer que quelques stations puissent également fonctionner la même année dans les régions boréales.

22. Sur un globe magnétique tournant dans un faisceau de rayons cathodiques.

En 1896, j'ai émis l'hypothèse que le Soleil émet de longs faisceaux de rayons cathodiques qui sont en partie, dans l'atmosphère terrestre, l'objet d'une succion de la part des pôles magnétiques, chaque fois qu'un des faisceaux en question frôle notre planète d'assez près.[1] J'ai cherché à expliquer ainsi la relation existant entre les taches du Soleil d'une part, les aurores polaires et les perturbations magnétiques de l'autre.

Dans deux mémoires publiés depuis lors, j'ai traité de quelques phénomènes se rattachant de très-près aux mêmes questions.[2]

D'après les résultats précédemment exposés de notre expédition des aurores boréales, il semble qu'il doive y avoir un intérêt considérable à examiner quels phénomènes on observera en exposant un globe magnétique à des radiations cathodiques dans de l'air raréfié. Il serait surtout intéressant de s'assurer s'il ne se développe pas autour d'un pareil globe des courants répondant dans une certaine mesure aux courants électriques qui, suivant toute probabilité, cheminent dans les couches supérieures de l'atmosphère, ainsi qu'il a été dit aux §§ 19 et 20.

J'ai jusqu'à présent fait deux séries d'expériences pour tirer cette question au clair. Dans ces expériences je me suis servi de tubes à décharge de formes et de dimensions variées.

L'électro - aimant sphérique qui devait représenter la Terre était entouré d'une mince écorce en laiton, recouverte d'une couche de cyanure double de baryum et de platine. Elle avait dans la première série d'expériences un diamètre de 40 mm., et de 75 mm. dans la seconde.



Fig. 5.

[1] Archives des Sciences phys. et nat., Genève, juin 1896.

[2] Même revue, Sept. 1898; voir aussi mon mémoire: Recherches sur les taches du Soleil et leur origine, Videnskabsselskabets Skrifter, Christiania 1899.

Le noyau en fer doux de l'électro-aimant avait dans les dernières expériences la forme représentée par la fig. 5 ci-contre. Le fer de l'un des pôles était creusé à la fraise à peu près en conformité avec la carte de Neumayer, représentant les lignes isodynamiques sur l'hémisphère boréal. Une différence de hauteur de 1 mm. entre les plateaux successifs gravés sur la sphère avait été choisie pour correspondre à une différence d'intensité de 0.02 C. G. S. sur la carte en question. On admet donc ainsi qu'il y a autour du pôle Sud de l'électro-aimant une répartition d'intensités répondant qualitativement dans une certaine mesure à la répartition du magnétisme autour du pôle boréal de la Terre. Au point de vue quantitatif, nous ne pouvons malheureusement pas nous procurer des conditions magnétiques conformes, le diamètre du globe en question n'ayant que 75 mm., c. a. d. étant 17.10^{7} fois plus petit que celui du globe terrestre.

Car, pour que le rapport entre la courbure des rayons cathodiques et celle du globe devînt convenable, il faudrait que le rayon de courbure de ces rayons fût pour chaque point réduit dans la proportion de $17.10^7 : 1$ par rapport à celui des rayons que nous supposons arrivant des espaces cosmiques et infléchis sous l'action du magnétisme terrestre. Pour cela, il faudrait que l'intensité du champ entourant notre sphère magnétique fut 17.10^7 fois plus grande que l'intensité analogue autour de la Terre, le rayon de courbure des rayons cathodiques étant inversement proportionnel à l'intensité du champ. Nous ne pouvons donc, et il s'en faut de beaucoup, rendre notre sphère assez fortement magnétique, car, comme on le sait, le maximum d'intensité de champ qu'on ait observé entre les pôles d'un puissant électro-aimant avec armature polaire terminée en cône n'est qu'environ 60000 fois plus grand que l'intensité aux pôles d'intensité les plus forts de la Terre.

Nous devions donc nous contenter de rendre notre électro-aimant aussi fort que possible; heureusement la structure purement extérieure que nous observerons dans les phénomènes lumineux ne semble pas varier bien essentiellement avec la force magnétique, pourvu que celle-ci ait déjà atteint une grandeur considérable.

La sphère électro-magnétique était dans mon expérience exposée à un courant de rayons cathodiques à peu près parallèles. Comme source d'électricité chargée de développer ces rayons, nous nous servions soit d'une machine à influence à 20 feuilles, soit d'une bobine de Ruhmkorff. Avec la machine à influence, on obtient un courant continu et par suite un potentiel de décharge relativement minime, même quand le gaz du tube de décharge est très-raréfié; on a par suite l'avantage d'obtenir des

rayons cathodiques faciles à dévier par des forces magnétiques,[1] en même temps qu'ils sont faiblement absorbés par le gaz très-raréfié du tube.

Aussitôt qu'on met l'électro-aimant sphérique en activité, les rayons cathodiques, qui avaient d'abord donné lieu à une phosphorescence régulière de l'hémisphère tourné vers la cathode, sont écartés de la surface de la sphère, sauf en certaines endroits des régions polaires.

On voit ici, au pôle nord comme au pôle sud, les rayons aspirés former un coin de lumière à structure rayonnée pouvant s'observer distinctement jusqu'à 5 cm. de la sphère, et se précipitant obliquement vers le globe.

Ces deux coins lumineux vont frapper la surface de la sphère et s'y manifestent par deux étroites bandes phosphorescentes, une au voisinage de chaque pôle.

Chacune d'elles s'étend à peu près le long du parallèle d'environ 70^0, à partir du point de la sphère dans le méridien duquel la cathode culmine et jusque très-avant dans le côté soir du petit modèle de la Terre, la cathode étant supposée représenter le Soleil.

Il n'y a pas de lueurs analogues du côté matin et matinée de la sphère.

Les coins lumineux en question se maintiennent sans grande variation pendant la rotation diurne de la »petite Terre«, seulement la surface de la sphère est frappée à une latitude un peu plus méridionale que de coutume, lorsqu'il est midi dans les régions entourant le pôle d'intensité maximum.

Outre les coins lumineux que l'on voit toujours aspirés vers les régions polaires de l'électro-aimant sphérique, j'ai pu parfois observer jusqu'à 3 tourbillons de courants autour de la sphère; ils se manifestent par des anneaux lumineux bien définis voisins de sa surface. L'un de ces anneaux est équatorial et enceint le petit modèle de la Terre presqu'à la façon d'un anneau de Saturne. Les deux autres font un demi-tour autour de chacun des deux pôles, pour obliquer ensuite vers les régions équatoriales.

A quelques oscillations près, ces anneaux lumineux conservent leur place dans l'espace pendant la rotation de l'électro-aimant sphérique autour de son axe, mais leur position dépend dans une forte mesure de l'état magnétique de la sphère.

On peut observer, au sujet de ces anneaux lumineux, mais surtout avec l'anneau équatorial, un phénomène excessivement intéressant.

[1] Le rayon de courbure des rayons est directement proportionnel à la racine carrée de la différence de potentiel entre les électrodes du tube de décharge, la force magnétique étant supposée invariable.

On voit que la surface de l'électro-aimant enduite de cyanure double de baryum et de platine devient parfois fortement phosphorescente juste au-dessous de l'anneau lumineux situé en-dehors d'elle. Ceci est surtout frappant du côté de la sphère opposé à la cathode, côté qui reste donc dans tous les cas situé dans l'ombre.

Cette phosphorescence de la surface de la sphère est évidemment due à des rayons cathodiques qui sont probablement émis par les particules gazeuses servant de véhicule à l'électricité et appartenant à l'anneau lumineux voisin, situé à l'extérieur de la sphère.

Ce phénomène pourrait peut-être s'expliquer en rapprochant ces faits des différentes observations relatées par Goldstein au sujet de la structure des rayons cathodiques.[1]

Il trouve que les rayons cathodiques de l'espèce K_3, comme il les appelle, partent de tous les points des rayons K_2, et de chacun de ces points dans toutes les directions possibles.

Il admet que cette émission diffuse de rayons K_3 émane de toutes les particules d'air frappées par des rayons K_2.

Comme nous le verrons par ce qui suit, les phénomènes observés sur les anneaux lumineux que je viens de mentionner nous donnent des indications quant à l'origine des arcs et des draperies des aurores boréales.

Je n'ai malheureusement pas pu photographier tous les remarquables phénomènes lumineux observés au cours de ces expériences, mon dernier tube de décharge s'étant brisé par accident, juste au moment où j'allais commencer à les photographier. Pour cette raison je décrirai ces expériences dans un mémoire à part quand je les aurai approfondies, et je remettrai donc à plus tard le compte-rendu des conditions et dispositifs que j'ai trouvés les plus convenables.

23. Nous avons vu dans la discussion précédente de nos résultats d'observation que l'idée que les fortes perturbations magnétiques se manifestant par des effets semblables sur de vastes portions de la surface terrestre sont provoquées par des courant électriques, nous a conduit à admettre l'existence dans les couches supérieures de l'atmosphère de puissants tourbillons de courants à intensité variable, mais à lignes de courants de configuration relativement fixe, dont nous avons cherché, au § 20, à préciser la position. Nous avons précédemment écarté l'objection principale que l'on pouvait opposer à notre hypothèse première,

[1] Sitzungsberichte der königlich preussischen Akademie der Wissenschaften, Berlin, XL, October 1897.

à savoir que les perturbations sont dues à des courants. L'observation qui a montré que les perturbations se manifestent en apparence à des moments bien différents aux différentes stations dispersées à la surface de la Terre, ne peut plus être invoquée contre notre hypothèse, depuis que nous avons prouvé que les lignes de courants dont il s'agit subissent un mouvement de translation à chaque recrudescence des courants.

Pour expliquer les perturbations magnétiques, on admettait depuis longtemps assez généralement déjà l'existence de courants électriques soit dans le sol, soit dans l'atmosphère.

Une des tentatives les plus intéressantes que l'on ait faites pour expliquer les phénomènes par des courants telluriques est due à Wijkander, dans sa discussion des observations magnétiques faites pendant l'expédition arctique suédoise en 1872—73.[1]

Il admet qu'il y a une zône de perturbations dans les régions polaires et que les diverses parties de cette zône entrent périodiquement dans l'état favorable à une production abondante de courants électriques. Ainsi la variation diurne dépend, d'une manière plus ou moins indirecte, de la position du Soleil.

»Le matin, les courants terrestres en général partent du centre de perturbation; le soir, il se font vers ce même point. Bien que ces courants, loin d'être continus, se fassent par secousses et avec des changements fréquents de direction, les observations prouvent qu'ils ne sont point des exceptions, mais qu'en règle générale ils se font toujours sentir avec plus ou moins de force.«

Nous voyons ainsi qu'il y a aussi eu en 1872—1873 dans la même journée deux directions marquées de courants, allant en sens à peu près opposé. Afin de comparer la direction des courants telluriques signalés par Wijkander à nos directions de courants électriques aériens pour 1882—1883, il faut se rappeler qu'on peut s'imaginer les premiers remplacés par des courants atmosphériques dirigés dans chaque cas en sens contraire à celui du courant tellurique supposé; car les perturbations dans les éléments horizontaux s'expliquent aussi bien dans les deux cas.

Dans les tout derniers temps, on s'est cependant de plus en plus habitué à admettre que les causes des perturbations magnétiques sont des courants électriques dans l'atmosphère, sans qu'on soit cependant fixé bien clairement sur les conditions physiques de pareils courants, et

[1] Aug. Wijkander, Kgl. Svenska Vetenskaps-Akademiens Handlingar, B. 14, No. 15, Stockholm 1876.

jusqu'ici on ne savait en outre que très peu de chose sur la marche habituelle des lignes de courants.

A la suite des recherches de Schuster et de Betzold, il semble que, sans nul doute, les variations diurnes du magnétisme terrestre ne peuvent être attribuées qu'à de semblables courants dans l'atmosphère. Ultérieurement, Ad. Schmidt,[1] en admettant l'existence de tourbillons de courants se déplaçant dans les couches supérieures de l'atmosphère, a rattaché les unes aux autres diverses particularités bien connues des orages magnétiques.

Nous nous permettons de citer ci-après quelques-unes des intéressantes conclusions du remarquable travail de ce savant:

»On reconnait qu'aux instants où se produisent de fortes variations à changements rapides, les forces perturbatrices observées sur les points voisins convergent à peu près vers un même point ou émergent d'un même point, tandis qu'aux époques de repos relatif, ils se rapprochent du parallélisme, suggérant ainsi l'idée d'un centre d'action éloigné. On voit encore qu'en général les points de convergence cheminent avec une vitesse dont l'ordre de grandeur se rapproche assez de 1 kilom. par seconde, mais que, souvent aussi, ils restent stationnaires.«

A l'appui de son opinion, et afin d'en rendre mieux compte, il s'attache à quelques exemples typiques, p. ex. l'orage magnétique du 28 février 1896, qui fut poursuivi exactement pendant une heure de 6 à 7^h, temps de Greenwich, à l'aide des observations internationales simultanées faites à l'instigation d'Eschenhagen. Les points d'observation étaient Kiel, Wilhelmshafen, Potsdam, Utrecht, Göttingen, Kew, Darmstadt, Paris, Vienne et Pola.

Il dit encore plus loin:

»Certains résultats obtenus par Wild, Wijkander et autres, sur la position des centres de perturbation les plus importants et les plus actifs, et en outre les constatations déjà faites sur la périodicité diurne des perturbations, et sur leur fréquence variable suivant les directions, permettent de conclure que les tourbillons de courants qui les ont provoquées sont liés de préférence à certaines places déterminées des grands systèmes de courants qui donnent lieu à la variation diurne, à peu près comme pour les minima partiels dans la répartition des pressions atmosphériques, qui se produisent de préférence sur le bord des grandes dépressions. Une des premières besognes auxquelles on devra s'attacher sera de

---

[1] Ad. Schmidt: Ueber die Ursache der magnetischen Stürme. Meteorologische Zeitschrift Sept. 1899.

se fixer plus exactement sur cette relation, et sur la nature et les allures des tourbillons perturbateurs, leur grandeur, leur intensité, leur vitesse, leur direction de marche etc. Ces constatations contribueront d'ailleurs aussi dans une large mesure à élucider la question de savoir s'il y a différence de principe entre la variation diurne habituelle et les perturbations élémentaires, ou si peut-être il n'y aurait pas une connexion essentielle entre eux, basée sur des transitions continues, ce qui semble en tout cas prouvé au moins en ce qui concerne leur extension dans l'espace et dans le temps. Les rapport existant avec les petites variations de courte durée découvertes par Eschenhagen (celles qu'il appelle les ondes élémentaires), variations qui par leur nature périodique semblent se distinguer nettement des perturbations proprement dites, seraient aussi un objet méritant examen.«

Comme on le voit, M. Schmidt prévoit que les tourbillons perturbateurs de nature relativement locale qu'il a examinées dans une région relativement restreinte de la Terre, font partie d'un système plus vaste de courants; il présume qu'ils se rattachent au système indiqué par Betzold d'après les calculs de Schuster.

Nous avons vu toutefois que le phénomène primaire auquel se rattachent les perturbations magnétiques et les ondes magnétiques régulières, et avec lequel il est permis de croire que la variation diurne du magnétisme terrestre se trouve aussi dans une certaine relation, semble constituer un système énorme de courants variables dans les couches supérieures de l'atmosphère, courants qui semblent avoir leur point de départ dans les régions polaires.

Dans les belles recherches de Carlheim-Gyllensköld sur la forme analytique de l'attraction magnétique de la Terre exprimée en fonction du temps,[1] l'auteur cherche la cause physique de changements séculaires de l'aimantation de la Terre dans une réaimantation continuelle produite par un système de courants électriques cheminant dans les couches supérieures de l'atmosphère.

Il pense que ces courants sont induits par suite du magnétisme terrestre dans les couches supérieures de l'atmosphère, supposée animée d'un mouvement de rotation uniforme dans le sens contraire à celui du mouvement diurne.

Partant de cette hypothèse, Gyllensköld rend compte par son analyse de la partie principale des changements dans l'aimantation de la

[1] Astronomiska Iakttagelser och Undersökningar. 5, no. 5. Stockholm 1896.

Terre; mais rien ne prouve que ce soient là les lois exactes régissant ce phénomène.

Il serait du plus haut intérêt de rechercher jusqu'à quel point les courants électriques dont on peut constater *expérimentalement* l'existence dans l'atmosphère sur toute la Terre par la méthode que nous avons suivie, suffiront aussi à expliquer les changements séculaires du magnétisme terrestre.

Appendice.

24. Les aurores polaires. On sait depuis longtemps qu'il existe une certaine liaison entre les perturbations magnétiques et les aurores boréales.

Cette liaison ne semble toutefois ni simple, ni directe. En effet, il est clair que ce ne sont pas tout à fait les mêmes conditions qui donnent lieu simultanément aux plus fortes perturbations magnétiques et aux plus fortes aurores boréales. Mais il est certain que quand un de ces phénomènes se manifeste avec une grande intensité, l'autre apparait à coup sûr, sans qu'on puisse pour cela trouver entre eux aucune proportion bien prononcée dans l'intensité.

J'indiquerai succinctement ci-dessous la notion de la nature et de l'origine des aurores polaires à laquelle semble aboutir la discussion des observations et des résultats de notre expédition des aurores boréales.

Les matériaux accumulés par les observations ininterrompues faites par les membres de l'expédition, chacun à son tour, seront publiés ultérieurement de concert avec ceux de nos photogrammes magnétiques qui présentent de l'intérêt à ce point de vue.

Cependant, nous allons le voir de suite, tandis que les perturbations magnétiques dépendent surtout de la quantité totale des courants électriques qui sont en jeu à chaque instant donné dans les couches supérieures de l'atmosphère, et à proximité du lieu d'observation, les aurores semblent surtout dépendre de la densité des courants en question.

On peut en effet prouver expérimentalement que, lorsque des courants électriques se manifestent dans les hautes couches de l'atmosphère avec une concentration suffisante, on se trouve, dans les régions polaires, dans les conditions voulues pour la production de phénomènes lumineux analogues aux aurores polaires dans toutes leurs formes différentes.

Dans la description des anneaux lumineux observés autour d'un électro-aimant sphérique placé dans un faisceau de rayons cathodiques, j'ai mentionné à la fin du § 22 un phénomène qui a servi de point de départ aux expériences qui vont nous prouver l'exactitude de notre assertion.

Comme on s'en souviendra, j'ai observé un rayonnement diffus de lumière cathodique par les différentes parties des anneaux lumineux nettement circonscrits autour du globe magnétique. Cette observation peut s'expliquer de la même manière que diverses autres dues à Goldstein sur la structure et les propriétés des rayons cathodiques.

D'après ce savant, nous pouvons admettre que des particules gazeuses frappées par des rayons cathodiques peuvent à leur tour émettre diffusément de nouveaux rayons analogues.

J'ai d'ailleurs trouvé antérieurement que les rayons émis par une cathode dans un champ magnétique suffisamment puissant semblent se développer uniquement dans la direction des lignes de force magnétiques. La fig. 1, pl. XI, est la photogravure d'un phénomène de cet ordre s'observant lorsqu'une cathode en forme de croix de Malte est placée au milieu d'une tube de décharge sphérique, le plan de la cathode étant perpendiculaire aux lignes de force magnétiques. En général, il se forme dans le gaz raréfié du tube une colonne lumineuse prononcée, dont la section est partout en forme de croix. Cette colonne part de la cathode à la fois avec des rayons convergents vers l'aimant jusqu'au moment où rencontrant le verre de la paroi, ils y dessinent une croix lumineuse en réduction, et avec des rayons divergents s'éloignant de l'aimant jusqu'à leur rencontre avec la paroi opposée, où ils dessinent une croix lumineuse agrandie.

Plus le gaz est raréfié dans le tube, moins la colonne lumineuse est visible dans l'espace à l'intérieur du tube, mais plus en même temps le dessin de la croix phosphorescente sur le verre devient intense. Dans l'expérience à laquelle se rapportent les phénomènes lumineux de la fig. 1, le gaz était fortement raréfié, afin de montrer clairement que la colonne lumineuse en question était bien formée par des rayons cathodiques, les croix lumineuses dessinées sur le verre étant alors en effet de couleur jaune verdâtre.

Mais en même temps, la colonne elle-même devenait indistincte, d'abord parceque son pouvoir lumineux est faible dans un gaz très-raréfié, et parceque les espaces obscurs de Crookes des deux côtés de

[1] Archives des Sciences phys. et nat. Genève, juin 1896.

la cathode ont une étendue de plusieurs centimètres en raison de la faible pression.

Cette expérience m'a conduit à croire que quand des particules d'air émettent des rayons cathodiques dans un champ magnétique, les rayons ne se développeront, là aussi, que le long des lignes de force magnétiques. Cette hypothèse a été entièrement confirmée, mais avant de décrire les expériences faites à ces fins, je vais rendre compte de quelques expériences antérieures, qui ont servi à tirer mieux au clair le régime des rayons cathodiques sous l'influence des forces magnétiques.

Ainsi la fig. 2 pl. XI, rend compte des phénomènes lumineux présentés par un tube de décharge en forme de poire, sous l'action d'un électro-aimant cylindrique disposé en avant du tube et suivant son axe, de telle façon que les rayons cathodiques se propagent vers un pôle magnétique.[1]

On voit comme quoi les rayons sont concentrés par l'action de l'aimant.

Plus instructive encore, en ce qui concerne les détails de ce phénomène de succion par un pôle magnétique, est l'expérience représentée par la fig. 3, où l'on s'est servi d'un tube de Crookes ordinaire à croix de Malte.

En suivant les changements qui ont lieu dans les taches lumineuses disparaissant et se reformant alternativement sur le fond du tube avec les ombres qui s'y dessinent à mesure que l'aimant se rapproche, j'ai réussi[2] à accorder avec les résultats de mes expériences la théorie de ces phénomènes exposée d'abord par Poincaré, conformément à l'hypothèse de Crookes sur la nature des rayons cathodiques.

M. Poincaré a montré par ses calculs que chaque rayon doit suivre une ligne géodésique sur un cône de révolution conjugué au rayon considéré et ayant son sommet au pôle magnétique.

En développant le cône d'un de ces rayons cathodiques, on obtiendra donc une trajectoire rectiligne. D'après cela le rayon se rapproche de l'aimant jusqu'à une distance minimum, pour rétrograder ensuite en suivant toujours le même cône de révolution. —

Je vais maintenant décrire un élégant phénomène lumineux, dont l'apparence est reproduite en photogravure par la pl. XII. L'expérience ainsi effectuée a montré comme quoi un gaz fortement raréfié, quand on

[1] Quelques auteurs attribuent cette dernière expérience à M. Swinton. Mes expériences étaient cependant déjà publiées dans diverses revues antérieurement aux communications faites par M. Swinton.

[2] Arch. des Sciences phys. et nat. Sept. 1898.

le fait traverser par des courants électriques suffisamment intenses dans un champ magnétique, émet des rayons cathodiques secondaires qui s'enroulent autour de lignes de force magnétiques, tant dans leur propre direction que dans le sens opposé, de façon à former un tapis continu de rayons le long du courant, lorsque celui-ci a quelque étendue linéaire.

La forme du tube de décharge ressort de la figure. L'anode et la cathode sont fondues dans deux petites boules de verre réunies entre elles par un tube dont le diamètre intérieur pris au milieu ne dépasse pas 3 millimètres. Sur une longueur de 6 centimètres la partie moyenne du tube a été passée à la meule de façon à ne laisser qu'une gouttière demi-cylindrique.

Extérieurement à cet étroit tube intérieur on a soudé un large manchon ellipsoïde en verre.

Dans l'expérience à laquelle se rapporte la figure, la pression du gaz dans le tube de décharge répondait à 0,012 millimètres de mercure. Les courants de décharge étaient produits par une machine d'influence à 20 feuillets, venant de chez Leuner à Dresde, et étaient envoyés dans le tube suivant la direction indiquée par la figure. Quand on faisait l'expérience sans aimant, il se produisait des phénomènes de décharge du genre habituel : en tout cas il n'y avait rien de saillant à remarquer. Si par contre on faisait agir un puissant électro-aimant cylindrique placé sous le tube et à une certaine distance de celui-ci, le pôle sud en haut, les décharges donnaient lieu à un mince rideau de rayons, rappelant d'une façon frappante les draperies de l'aurore boréale.

Nous allons d'abord décrire ici les phénomènes tels qu'ils sautent directement aux yeux; ils sont indubitablement dûs à des courants venant de la cathode. Plus importants encore au point de vue de l'explication des aurores polaires sont certains autres phénomènes dûs à des courants venant de l'anode, mais qui ne deviennent clairement visibles que dans certaines conditions expérimentales particulières.

La photographie du phénomène reproduit par la pl. XII est prise à droite en haut par rapport à la normale au rideau mince élevée en son point médian. On a procédé de la sorte pour bien faire voir sur l'image combien ce rideau est mince, n'ayant même pas ici 1 millimètre d'épaisseur.

On voit clairement le rideau lumineux couper la paroi interne du manchon ellipsoïde, en haut en avant et en bas en arrière du contour du tube, si l'on veut bien se reporter à notre point de vue.

La photographie est prise au moyen d'un puissant objectif, avec un temps de pose de 10 secondes, sans diaphragme.

La raideur et la rectitude des rayons du rideau ne se manifeste pas aussi bien sur notre planche que dans la photographie originale.

Lorsqu'on laissait l'électro-aimant pôle nord en haut, avec la même direction du courant dans le tube de décharge, le courant était rejeté dans l'espace circonscrit par le gros manchon en verre, au lieu d'être, comme tout à l'heure, forcé de rester enfermé dans l'étroite gouttière demi-cylindrique.

Dans ce cas, on peut cependant aussi observer des rayons — de fines aiguilles lumineuses quelquefois bien distinctes —, le long des lignes de force magnétiques dans la mesure où ils peuvent se développer dans l'espace intérieur limité par le manchon ellipsoïde. Toutefois ces rayons sont peu lumineux dans le cas actuel, mais en revanche ils remplissent la majeure partie de l'espace situé en avant de la gouttière demi-cylindrique, entre celle-ci et le manchon ellipsoïde.

Il ne se forme donc plus ici de rideau lumineux : là seulement où le courant négatif quitte l'étroit tube intérieur, il se produit un faisceau intense de rayons le long des lignes de force magnétiques.

Lorsque le pôle sud de l'électro-aimant est tourné en haut, de façon à former un rideau lumineux, on voit aussi que celui-ci est plus fortement lumineux du côté tourné vers la cathode que du côté tourné vers l'anode. Dans notre photogravure, plusieurs des rayons les moins lumineux sont effacés vers le pôle positif. Il semble d'après cela que ce soient précisément des rayons émis par l'électrode négative qui donnent l'éveil aux rayons secondaires formant le rideau. Peut-être, comme Goldstein croit l'avoir prouvé par ses expériences, sont-ce les particules gazeuses frappées par les rayons cathodiques qui émettent diffusément de nouveaux rayons.

Si les rayons émis par la cathode réussissent à ramper le long de la paroi du tube interne, sans se laisser dévier vers le verre par les forces magnétiques intenses, de telle sorte qu'ils cessent de se propager, cela est dû soit directement à une répulsion électrostatique, soit à une espèce ou l'autre de réflexion des rayons contre le verre.

Ce ne sont toujours pas les particules vitreuses de la gouttière demi-cylindrique qui émettent à l'état diffus les rayons formant le rideau lumineux : c'est là ce qu'on peut conclure de l'expérience précédente, où l'électro-aimant avait son pôle nord en haut, le courant de décharge étant alors rejeté dans l'espace circonscrit par le gros manchon externe. On observait alors en effet, le long des lignes de force magnétiques, des rayons lumineux traversant l'espace libre situé à l'intérieur du récipient,

et il y a lieu de croire que ces rayons étaient principalement diffusés par les particules gazeuses servant de véhicule au courant de décharge.

Si aux lieu et place de la machine à influence, on emploie comme source de courant une forte bobine de Ruhmkorff avec interrupteur de Wehnelt, on obtient un rideau complet, également développé vers le côté positif : mais il se produit en même temps tant de lumière dans le manchon extérieur que le phénomène ne se manifeste pas à beaucoup près d'une façon aussi distincte.

Il est possible de concevoir encore d'une autre façon la formation des rideaux lumineux. On peut en effet imaginer que les rayons de la cathode réussissent peu à peu à dépasser les bords de la gouttière demi-cylindrique pour être ensuite immédiatement forcés de se propager le long des lignes de force magnétiques en s'enroulant autour d'elles. L'ensemble des rayons donne ainsi lieu au rideau à structure rayonnée.

Nous arriverons sur ce point, par les expériences qui vont suivre, à une conception plus arrêtée.

Pour ce qui est de la couleur du rideau lumineux en question, nous constatons qu'elle varie fort avec la pression du gaz et, dans une certaine mesure, avec l'intensité du courant de décharge.

Dans de l'air soumis à une pression relativement considérable, et plus élevée que celle sous laquelle les rayons cathodiques se manifestent par une phosphorescence des parois du tube de décharge, le rideau lumineux a une couleur gris-jaunâtre.

A une pression un peu plus basse, la couleur devient plutôt rougeâtre. Qand le gaz du tube est fortement raréfié, les rayons du rideau deviennent blancs, avec un ton bleu-violet, mais les rayons proprement dits, apparaissant d'une façon distincte, sont nettement entourés d'un manteau lumineux de couleur orange, avec délimitation peu prononcée. Ceci apparait surtout bien lorsque le pôle nord de l'aimant est tourné vers le haut, de telle façon que le courant de décharge se trouve lancé dans l'espace en avant de la gouttière demi-cylindrique. Comme je l'ai déjà dit, outre quelques faibles aiguilles lumineuses ou fils apparaissant dans tout l'intérieur du tube, il se produit aussi un faisceau lumineux intense à l'extrémité négative de la gouttière demi-cylindrique; cette radiation est magnifiquement colorée, l'intérieur en bleu-violet-blanchâtre, et entourée d'un manteau lumineux distinct de couleur orange.

J'ai observé ces phénomènes non-seulement dans l'air, mais aussi dans l'hydrogène, l'argon et l'hélium : Ces deux derniers gaz avaient été gracieusement mis à ma disposition par M. W. Ramsay.

Voici un extrait de journal d'observations au sujet de cette expérience :

Avec l'hydrogène. Déjà avec une pression atteignant $0^{mm}0785$, il se produisait un rideau lumineux, les rayons étaient distincts, minces et monochromes — lilas presque blanc —. Il y avait une grande différence de pouvoir lumineux du côté négatif au côté positif, mais le rideau apparaissait presque partout.

Après un coup de pompe, on mesura une pression de $0^{mm}0465$. Le rideau lumineux plus saillant qu'auparavant, mais toujours à peu près de la même couleur. A la pression de $0^{mm}029$, la couleur était un peu plus bleuâtre. Il se produit alors à l'extrémité négative une forte phosphorescence verte du tube, due à des rayons cathodiques.

A la pression de 0.0184, le rideau était plus régulier et plus large. Puissants rayons cathodiques.

A $0^{mm}0109$ le rideau commençait à se rétrécir à l'extrémité positive.

Après un coup de pompe, le rideau devint encore plus étroit; après un coup encore, la diminution continua, et la lueur s'affaiblit.

Avec l'argon. A la pression de 0.025, le rideau était certes développé, mais sans structure rayonnée distincte, sa couleur rose. A l'extrémité négative du tube, il y avait de la lumière négative bleuâtre sans rayons cathodiques susceptibles de provoquer la phosphorescence du verre. A 0.0160 le rideau était élargi. Les rayons violet-clair au milieu, et entourés d'un manteau rouge.

A 0.0096, les rayons du rideau devenaient encore plus distincts. Les rayons cathodiques se révèlaient par la phosphorescence de l'extrémité négative du tube.

A $0^{mm}0065$, les rayons étaient plus intenses et plus distincts, mais le rideau moins large qu'auparavant.

Après un coup de pompe, la situation restait à peu près la même; après un coup encore, le rideau lumineux avait une largeur considérablement réduite.

Avec l'hélium. Sous une pression de $0.^{mm}12$, on observait un rideau lumineux étroit et gris sans rayons distincts. A 0.065, le rideau était un peu plus large. A 0.0445, le rideau était beaucoup plus large; il offrait une coloration verte prononcée.

A 0.0305, c'est tout juste si on distinguait des rayons dans le rideau, qui continuait à s'élargir. A $0^{mm}0179$ le rideau couvrait presque entièrement la gouttière demicylindrique.

A une pression de $0^{mm}0132$, on constatait de la lumière cathodique, et le rideau était d'une structure plus fortement rayonnée qu'auparavant.

Sous $0^{mm}00847$ de pression, le rideau était bien prononcé, mais il y avait en-dehors de lui beaucoup de lumière dans le tube. Rayons cathodiques marqués.

A une pression de $0^{mm}00563$, il y avait des rayons cathodiques plus forts et une structure plus distinctement rayonnée. La couleur verte bien distincte qu'avait au début le rideau dans l'hélium, avait plus tard diminué et finalement disparu. La couleur est devenue d'un gris-violet tirant sur le blanc.

On donna encore 3 coups successifs de piston, et le rideau devint de plus en plus étroit et de plus en plus indistinct.

Comme il a été dit au § précédent, M. Goldstein a montré que lorsqu'on fait des décharges dans des gaz raréfiés, les rayons K_2 émettent de chacun de leurs points des rayons diffus K_3 partant dans tous les sens.

Il dit à leur sujet [1] :

---

[1] l. c., p. 913.

»Les rayons diffus ont dans beaucoup de cas une couleur tout-à-fait différente de celle des rayons émettants K_2; dans l'oxygène, les rayons K_2 sont violets, les rayons K_3, suivant la plus ou moins grande raréfaction du gaz, jaunes, jaune-verdâtre ou gris; dans l'acide carbonique, la lumière K_2 est bleu-clair, K_3 blanc verdâtre; dans l'hydrogène, K_2 bleuâtre, K_3 blanchâtre et ainsi de suite.«

Comme je l'ai déjà signalé, on peut, dans des conditions spéciales d'expérience, observer à l'extrémité positive de la gouttière demi-cylindrique des phénomènes lumineux présentant bien plus d'intérêt que le rideau qui vient d'être décrit comme se produisant à l'extrémité négative de la gouttière.

Si en effet on affaiblit le courant de décharge en tournant lentement les plateaux de la machine à influence, en même temps qu'on rend la force magnétique assez puissante, on voit sortir par l'ouverture du tube interne, large de 3 millimètres, un ou plusieurs rubans lumineux qui se déroulent en spirales plus ou moins parallèles, sur une longueur considérable. J'ai estimé que la longueur totale de certains de ces rubans pouvait atteindre 30 centimètres.

Pendant mon expérience, le tube de décharge était placé juste audessus de l'aimant cylindrique de telle sorte que l'axe du tube se trouvait placé perpendiculairement à celui de l'aimant. L'aimant avait une longueur de 60 cm. avec un noyau en fer doux de 10 cm. de diamètre.

Les rubans lumineux dont je parlais il y a un instant se développaient dans un plan passant par l'axe du tube et perpendiculaire à celui de l'aimant : ils avaient une forme tout-à-fait aplatie, et semblaient composés d'un grand nombre de rayons lumineux serrés les uns contre les autres, et parallèles en chaque point aux lignes de force magnétiques. La longueur de ces rayons pendant en nappes variait beaucoup avec l'intensité de la décharge et la force de l'aimant. Ils avaient le plus généralement une longueur de 4 à 5 cm. à l'embouchure même du tube étroit; vers l'extrémité du ruban la longueur des rayons pouvait être de 1 à 2 cm.

Les rubans lumineux formaient évidemment la continuation d'un étroit cordon lumineux blanc, qui se tenait serré contre la paroi du tube intérieur étroit et du côté où le courant était refoulé par la force magnétique.

Si le tube de décharge est placé près de l'aimant, les rubans lumineux tourbillonnent à l'intérieur avec de nombreuses circonvolutions en spirales serrées, et on y observe des mouvements désordonnés. Parfois il peut, dans ces conditions, se produire un phénomène nouveau, en ce

que le long des lignes de force magnétiques, plusieurs grosses colonnes assez fortement lumineuses surgissent comme des éclairs ou des dards dans tout l'espace circonscrit par le manchon extérieur en verre. Ces colonnes s'élèvent librement dans l'espace et sont nettement séparées par des gaz relativement obscurs; je les ai vues à 1 cm. les unes des autres. Elles se produisent surtout bien lorsqu'on intercale un petit interrupteur d'étincelles dans le fil conducteur arrivant au tube de décharge.

Si le tube de décharge est situé plus haut relativement à l'aimant, les rubans se développent plus tranquillement; on les distingue plus nettement les uns des autres, quand il y en a plusieurs, et ils se déroulent en plusieurs tours de spirale jusqu'au moment où ils sont arrêtés par le verre.

Un des phénomènes les plus remarquables qu'on puisse observer avec ces rubans et les rayons en girandoles dont ils semblent être constitués, c'est leur sensibilité vis-à-vis des actions électrostatiques.

Si l'on met le doigt sur un point du manchon ellipsoïdal au voisinage du plan dans lequel se développent principalement les rubans lumineux, on voit immédiatement ces rubans être attirés et se rapprocher, parfois de plusieurs centimètres, du point où l'on a posé le doigt.

Si au contraire, on met le doigt sur le verre en un point situé en prolongement des rayons composant les rubans, on voit ces rayons se raccourcir dans la direction du doigt, alors que, par exemple, ils étaient assez longs pour traverser de part en part l'espace renfermé dans le manchon ellipsoïdal, il se peut qu'ils se trouvent maintenant raccourcis de 2 à 3 cm. dans la direction du point où l'on a posé le doigt.

Si l'on faisait dévier un peu le tube de décharge, de telle façon que son axe ne fût plus perpendiculaire à celui de l'aimant, on voyait les rubans lumineux se répartir à peu près entre deux plans, l'un passant par le centre de l'embouchure du tube intérieur étroit et perpendiculaire à l'axe de l'aimant, et l'autre par l'axe du tube perpendiculairement au plan des deux axes.

Si l'on rend le courant de décharge de plus en plus fort en tournant de plus en plus rapidement les plaques de la machine à influence, on voit disparaître peu à peu l'impression de rubans distincts laissée par les décharges ayant eu lieu avec un courant faible; les rubans se multiplient en devenant de moins en moins distincts, et se jettent de plus en plus confusément de côté et d'autre, si bien que finalement l'espace tout entier semble rempli par les décharges.

On observe alors que les rayons ou aiguilles lumineuses qui traversaient d'abord les rubans semblent s'élancer dans tout cet espace, mais

surtout bien distinctement au voisinage et au côté positif de l'embouchure du tube étroit. Par un examen peu approfondi, on ne voit dans ce cas à l'extrémité positive de la gouttière demi-cylindrique qu'un nuage lumineux, comme à la pl. XII.

Ces phénomènes sont en effet très-fugitifs et d'une faible intensité lumineuse, et ne se laissent pas photographier.

On comprendra sans peine, par la description qui précède, à quel point et combien nettement les phénomènes lumineux ici observés rappellent les différentes formes d'aurores boréales, rubans, rideaux, fils : même les dards dans une couronne ont ici leurs analogues dans les colonnes lumineuses qui se produisent tout-à-coup lorsque le tube de décharge est voisin de l'aimant.

S'il me fallait reproduire quelques-uns des rubans que j'ai observés, mes dessins ressembleraient beaucoup aux dessins des bandes-types d'aurores boréales que l'on trouve reproduits dans plusieurs relations d'expéditions polaires; je pourrai ainsi renvoyer tout spécialement à la fig. 50 des »Beobachtungs-Ergebnisse« de la station polaire autrichienne à Jan Mayn, Tome II, 1ère partie.

Pour obtenir de la façon la plus convenable les bandes aurorales artificielles dont j'ai parlé plus haut j'ai fait construire un tube de décharge représenté par la fig. 6 :

La cathode était placée dans un tube en verre de 3 cm. de diamètre, replié deux fois à angle droit, avant de déboucher dans un récipient sphérique ayant 15 centimètres de diamètre. Cette disposition était adoptée afin qu'aucune espèce de rayons cathodiques ne pût pénétrer dans la grosse sphère.[1]

L'anode était disposée dans une petite sphère de 4 centimètres de diamètre, à laquelle était soudé un étroit tube en verre ayant 5 millimètres de diamètre intérieur.

Ce tube débouchait tout près du centre de la grosse sphère à laquelle il était soudé comme l'indique la figure. Celle-ci indique également la position de l'aimant : c'était le même puissant électro-aimant cylindrique que j'ai déjà mentionné auparavant, et qui dans la présente expérience avait son pôle sud tourné vers le haut.

Le courant parcourant le tube de décharge était fourni par une machine ordinaire de Holz avec rotation lente du disque de verre.

Le tube de décharge doit être vidé d'air assez complètement, de telle sorte que les parois intérieures et les électrodes soient bien exemptes de gaz occlus.

---

[1] Goldstein : Ueber die Structur des Kathodenlichts, l. c., p. 907.

Au cours de l'expérience, la pression du gaz doit être telle que la différence de potentiel entre les électrodes soit voisine de 10000 volts.

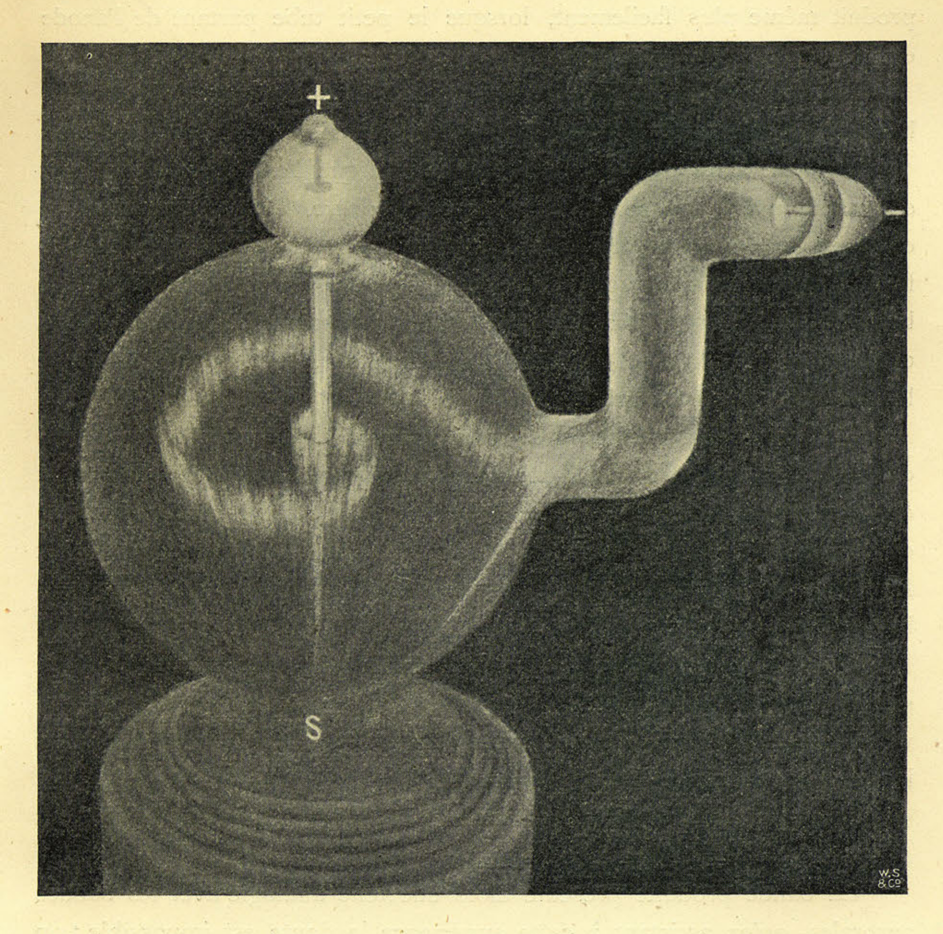


Fig. 6. Bande aurorale artificielle.

On voit par la figure comment sous l'action des forces magnétiques le courant positif de décharge prend la forme d'une bande, qui vue par en haut, s'enroule en une spirale de sens normal. Si l'on retourne les pôle de l'aimant, la spirale tourne à rebours. Les aiguilles lumineuses qui rayonnent de la bande de lumière le long des lignes de force magnétiques peuvent souvent être plus longues et plus prononcées que ne le montre la figure.

Lorsque le courant de décharge devient plus fort, on voit souvent une série de bandes lumineuses s'enroulant en spirales les unes à côté des autres.

Si l'on fait tourner le tube de décharge autour d'un axe situé dans le plan du dessin perpendiculairement à l'axe de l'aimant, la bande lumi-

neuse continuera à se produire à peu près de la même façon qu'auparavant, mais avec des allures notablement plus irrégulières. La bande se produit même plus facilement, lorsque le petit tube partant de l'anode est placé obliquement par rapport à l'axe de l'aimant.

J'ai pu dans une sphère de 22 centimètres de diamètre obtenir une bande lumineuse spirale d'une longueur totale de plus de 70 centimètres.

On peut aussi s'arranger de telle sorte que l'anode circulaire soit elle-même placée au centre de la grosse sphère, et l'on évite ainsi de conduire le courant positif à travers le mince tube de verre. Sous l'influence de l'aimant on voit alors encore se développer sans difficulté une belle bande lumineuse simple, à structure rayonnée, partant d'un point de l'anode et s'enroulant en spirale autour d'elle, tout comme la bande lumineuse déjà mentionnée.

Dans cette expérience, ni la force magnétique ni le courant de décharge ne doivent être trop forts, car alors le courant positif rayonnerait de chaque point du contour de l'anode, et il en résulte autour de celle-ci une auréole de rayons d'une forme singulière. Lorsque l'anode est formée d'une petite croix de Malte, cette auréole est un phénomène très-brillant.

Les bandes aurorales artificielles que je viens de décrire sont en général très-mobiles et très-changeantes. Dans certaines conditions convenables seulement, il y a une tranquillité relative et la bande se développe alors avec une beauté ravissante.

Les rayons qui s'y forment varient de longueur, jouent et dansent comme les »merry dancers« des bandes aurorales.

La bande produite présente alors une telle analogie avec les bandes aurorales, qu'en assistant à cette expérience le doute est impossible : on voit jusqu'à l'évidence que le deux phénomènes sont apparentés de très-près.

La rotation dans les spirales lumineuses des bandes est en sens inverse de celle qui se produirait, si la force magnétique eût agi sur un conducteur de courant flexible; ce qui est bien singulier. Ceci prouve clairement que cette rotation doit être due à quelque action secondaire, et non à l'action primaire de la force magnétique sur le courant de décharge.

Cette anomalie remarquable se laisse encore constater d'une autre manière.

Le tube de décharge représenté fig. 6, est retourné de telle sorte que le petit tube qui partait précédemment de l'anode devienne perpendiculaire à l'axe de l'aimant, après quoi le courant de décharge est

changé de sens de façon à ce que la bande positive de courant aille maintenant du tube recourbé au gros ballon.

On voit alors de l'embouchure du tube étroit, au centre du ballon, jaillir le long de l'axe de l'aimant une colonne lumineuse intense, formée de rayons négatifs : cette colonne est immobile et raide. Dans cette colonne négative se fond bientôt la bande positive qui s'est élargie dans l'intérieur du ballon par radiations secondaires d'aiguilles lumineuses distinctes, tombantes et dansantes, longues de 5 à 6 centimètres.

La bande finit par être totalement absorbée par la colonne lumineuse négative, mais le ruban ne se dirige pas en droite ligne sur la colonne : il s'en approche en formant une petite spirale. Cette spirale, qui change de sens lorsqu'on intervertit les pôles de l'aimant, est aussi de sens contraire à celui auquel donnerait lieu un conducteur de courant flexible, qui serait soumis à l'action de la force magnétique.

Nous nous trouvons ici en face d'un phénomène qui semble éclairer un des points difficiles rencontrés précédemment.

Nous avons au § 19 discuté la raison possible qui fait que le courant électrique dans l'atmosphère de notre hémisphère oscille de gauche à droite par chaque recrudescence du courant, pour un observateur regardant dans le sens de ce courant.

On se fût attendu, en raison du magnétisme terrestre, à une oscillation en sens inverse.

Il se peut que la raison de l'oscillation que l'on a observée soit de nature secondaire, comme celle qui fait tourner en sens contraire à nos prévisions les spirales de notre expérience.

Le résultat principal de ces expériences est qu'avec de faibles decharges à travers des gaz raréfiés dans un champ magnétique, le courant positif se propage à travers l'espace en rubans distincts bien limités.

Les rubans de courants laissent rayonner à leur tour des rayons cathodiques secondaires, ou en tout cas des rayons apparentés, et subissant comme eux l'influence des forces magnétiques. Les rayons émis à titre secondaire se développent en effet uniquement le long des lignes de force magnétiques, ainsi que j'ai montré antérieurement que le faisaient les rayons cathodiques.

Il semble ressortir du résultat ci-dessus que les molécules gazeuses qui transportent le courant électrique dans des gaz raréfiés émettent toujours des rayons cathodiques diffus. Ceci peut être considéré comme une

généralisation des conclusions de Goldstein, que les masses gazeuses frappées par des rayons cathodiques émettent les radiations secondaires à l'état diffus.

25. Nous avons trouvé que dans les régions polaires, dans les couches les plus élevées de l'atmosphère, cheminent de puissants courants électriques qui semblent souvent, dans les localités où l'on a pu étudier leur allure, suivre de près, d'une façon très-frappante, la même direction que la ceinture maximum des aurores boréales (voir p. 28).

Par les recherches décrites au § précédent, nous avons de plus établi comme excessivement probable que sous l'influence du magnétisme terrestre de pareils courants électriques doivent donner lieu à des phénomènes lumineux tout-à-fait analogues à ceux qu'on constate dans les aurores des régions polaires.

Pour cette raison, nous allons chercher à préciser, en nous basant sur l'expérience acquise au cours de nos essais, dans quelles conditions spéciales on doit supposer que se produisent les principales formes différentes d'aurores boréales, et nous verrons que toutes les propriétés caractéristiques de la lumière polaire se laissent expliquer très-naturellement en partant de notre manière de voir.

Pour chacune des formes d'aurore boréale que nous allons énumérer plus bas, et entre lesquelles on fait généralement une distinction, les caractères et les propriétés les plus essentiels vont être relatés conformement aux travaux d'autres observateurs et plus spécialement à ceux de Carl Weyprecht.[1]

Bandes. Phénomènes irréguliers, très variables dans leur forme, laissant presque constamment l'impression d'une bande allant à la dérive dans l'atmosphère, beaucoup plus longue que large, et recourbée généralement en boucles et en plis. Elles se composent soit de matière lumineuse inégalement répartie, soit de rayons pressés les uns contre les autres, et dont les intervalles sont remplis de matière lumineuse.

Les bandes peuvent s'étendre dans n'importe quelle direction, cependant elles ont une tendance marquée à se diriger à peu près vers l'Est-Ouest magnétique.

Si dans les bandes, on trouve des rayons développés distinctement, parallèles aux lignes de force magnétiques, et ordonnés en séries, ces

[1] Die Nordlichtbeobachtungen der Oesterreichisch-Ungarischen Arctischen Expedition 1872—74. Wien 1878.

rayons sont le plus souvent développés dans le sens du zénith, de telle sorte que la bande elle-même forme la large lisière inférieure de la série de rayons. Parfois cependant, les rayons dépassent aussi de beaucoup le bord inférieur et sont tournés vers le sol. Des vents violents semblent exercer une influence sur les bandes; surtout après une tempête, celles-ci semblent excessivement déchiquetées avec des modifications continuelles de forme et de position.

Conformément à ce que nous avons appris par nos essais, il semble naturel de concevoir une bande d'aurore boréale comme un phénomène lumineux se produisant lorsqu'un rameau limité et suffisamment concentré d'un courant électrique de même espèce que le courant positif d'un tube de décharge s'élance entre les couches supérieures de l'atmosphère à peu près parallèlement à la surface de la Terre. Les rayons qui s'échappent des bandes vers le zénith et parfois vers le sol sont des phénomènes secondaires dûs à ce que les masses d'air traversées diffusent des rayons négatifs qui, contraints par le magnétisme terrestre, se rangent en rideaux lumineux à structure rayonnée, tout comme dans nos expériences. Les transformations et les soubresauts parfois très-rapides que l'on peut observer dans les bandes, surtout après une tempête, peuvent être supposés d'après nos expériences provoqués par des influences électrostatiques. En effet, d'une part, les rayons diffusés par les bandes (et dont la longueur dans le sens vertical peut souvent être estimée à plusieurs dixaines de kilomètres) provoquent dans l'atmosphère même des charges électrostatiques qui réagissent à leur tour sur les bandes, et d'autre part, le frottement considérable qui se produit entre les couches aériennes pendant une tempête donnent lieu dans l'atmosphère à des décharges électriques fortement variables.

Quant à savoir dans quelle direction les rayons se développeront de préférence, vers le zénith ou vers le sol, cela dépendra certainement en tout premier lieu de la densité des couches atmosphériques, mais peut-être encore bien plus de l'action électrostatique exercée par la Terre.

Arcs. Ils sont en relation très-intime avec les bandes aurorales. Ce sont des phénomènes à peu près réguliers, affectant à peu près la forme de l'arc-en-ciel, qui montent ou qui descendent du Nord ou du Sud magnétique, du zénith ou vers le zénith.

L'arc se produit de préférence au début d'une aurore boréale; ses pulsations tranquilles et sa longue durée constituent ses caractères essentiels. La largeur des arcs varie depuis l'arc ayant l'épaisseur d'un fil, jusqu'à la masse lumineuse occupant à peu près la moitié du firmament.

Les arcs sont le plus souvent nettement délimités sur leur bord inférieur, sans contours précis vers le haut, lorsque leur lumière se trouve régulièrement répartie sans laisser voir de rayons.

La direction générale des arcs est à peu près la même que la direction moyenne des bandes, et est le plus souvent à peu près perpendiculaire au méridien magnétique.

Ainsi que les bandes aurorales, les arcs peuvent être considérés comme des lueurs produites dans les couches les plus hautes de l'atmosphère par des courants électriques suffisamment concentrés et délimités, parallèles à la surface de la Terre.

Pour décider si la direction, l'intensité et la position des courants électriques dans l'atmosphère, autant qu'on en peut juger à l'aide des perturbations magnétiques, sont en rapport avec la production et la direction des arcs auroraux, j'ai comparé les courants simultanés avec les observations d'aurores boréales qui ont été faites par notre expédition en 1899—1900, et j'ai en outre mis en œuvre une partie des matériaux recueillis en 1882—1883 à Bossekop et à Jan Mayn.

Pour résumer ces recherches, je dirai seulement que les aurores boréales intenses et très-mobiles coïncident clairement en tous lieux et en tout temps avec des perturbations magnétiques intenses et à alternances rapides.

Dans ce cas, il y aurait lieu d'admettre que les courants qui se manifestent sont assez fortement concentrés le long de certaines lignes de courants en oscillations de translation.

En ce qui concerne les formes d'aurore les plus fréquentes, arcs et bandes, il semble que les arcs se montrent à la fois pendant des perturbations magnétiques de faible et de forte intensité. Bien souvent, il était impossible de rien décider quant à la position de la ligne moyenne de courant relativement à l'arc auroral, mais lorsque la chose était possible, on a constaté qu'on voyait toujours l'arc là où le courant a passé, et que le plus souvent sa direction est à peu près celle du courant.

Il convient cependant de faire remarquer ici que si, sur un point donné, on observe un arc auroral éloigné, p. ex., très-haut vers le Nord, la branche de courant très-dense que nous supposons donner naissance à l'arc ne pourra souvent pas être supposée agir sur les magnétomètres du lieu d'observation aussi fortement que d'autres courants ayant peut-être moins de densité, mais une grande intensité totale, et cheminant dans les couches atmosphériques dans le voisinage immédiat.

De pareils cas se sont pour sûr présentés assez fréquemment à Bossekop pendant l'hiver de 1899 à 1900.

Les bandes aurorales avec mouvements et les rideaux semblent ne se former que sous l'influence d'un fort courant à variations continuelles.

Des variations subites des perturbations magnétiques et par suite aussi des courants électriques de l'atmosphère semblent très-souvent être concomitantes avec une scission des bandes aurorales ou des arcs, ou avec la formation soit de nouvelles bandes, soit de nouveaux arcs.

Lorsqu'on voyait par les perturbations que le courant cheminait au Nord de Bossekop et au Sud de Jan Mayn, les aurores boréales observées à Bossekop se sont montrées dans le Nord, tandis qu'à Jan Mayn, on les voyait généralement au Sud.

Il résulte des diagrammes des vecteurs de courants, pl. II, qu'aux stations polaires de 1882—1883, les courants les plus puissants avaient une forte tendance à aller vers l'Est ou vers l'Ouest, ce qui semble s'accorder bien avec le fait que les arcs se développent principalement dans une direction à peu près perpendiculaire au méridien magnétique. A Bossekop, le point culminant des arcs auroraux se trouve d'ailleurs le plus souvent assez à l'Ouest de méridien magnétique; ceci concorde bien avec la constatation que, dans cette localité, les courants ont une direction soit Sud-Ouest soit Nord-Est.

Le mouvement spécial aux arcs auroraux et aux bandes aurorales, perpendiculairement à leur direction longitudinale vers le Nord ou vers le Sud magnétique, est un phénomène analogue aux oscillations translatoires des lignes de courants, lors de chaque recrudescence, qui comme nous l'avons vu, se manifeste dans les courants électriques cheminant dans les couches supérieures de l'atmosphère entre les stations de Pawlowsk et de Toronto.

Nous avons trouvé qu'a ces latitudes la translation latérale des lignes de courant peut généralement avoir lieu avec une vitesse correspondant à 100 kilom. par minute. Les bandes aurorales qui, dans les régions polaires, passent à côté du zénith, se déplacent souvent, à ce qu'il semble, avec une vitesse de 300 m. par seconde.

Les migrations annuelles et undécennales des arcs et des bandes, ou la translation vers d'autres latitudes de leur zône de plus grande fréquence, doivent, si notre conception est correcte, être accompagnées de translations annuelles et undécennales analogues du courant électrique dans les couches supérieures de l'atmosphère. Ces questions ne sont pas encore assez approfondies, et il faudra déduire des perturbations magnétiques la direction des courants et leur position dans les années voisines des maxima et des minima des taches du Soleil.

Pour de pareilles recherches, il conviendrait d'avoir de préférence des matériaux empruntés à plusieurs stations polaires situées à 500—1000 kilomètres les unes des autres, de côté et d'autre de la zône des aurores.

Si l'on compare la période diurne des aurores boréales à la période diurne du courant de l'atmosphère, on remarque bien vite que l'époque du maximum ne coincide pas pour les deux phénomènes. Lorsque le courant est d'une grande intensité sans variations ni grosses ni fréquentes, il y a souvent assez peu d'aurores boréales au sens ordinaire, mais autant que j'ai pu l'observer, tout le ciel est toujours couvert d'une lueur régulière plus ou moins faible.

Cette différence entre les deux phénomènes n'invalide en rien notre hypothèse, car nous avons précisément vu par nos expériences que c'est spécialement qand le courant est faible, qu'il a la faculté de se concentrer en bandes minces. Lorsque l'intensité du courant s'accroit, il remplit de plus en plus tout l'espace dont il dispose, en même temps qu'en chaque point donné sa densité devient moins grande qu'auparavant.

La lumière tranquille, souvent intense et régulière, qui forme par en bas la délimitation des arcs auroraux lointains du côté du segment que l'on appelle segment obscur, est probablement la lumière de couches atmosphériques peu lumineuses, mais très-larges, servant de conducteurs aux puissants courants perturbateurs dans les couches supérieures de l'atmosphère.

De pareils arcs n'ont souvent pas de contours précis par en haut. On peut imaginer que les courants dans l'atmosphère ont une largeur considérable comparativement à la hauteur des couches d'air traversées par eux. Alors plus les courants passent près du zénith du lieu d'observation, plus minces sont les couches d'air illuminées dans lesquelles notre regard pénêtre, et par suite elles paraissent d'autant moins lumineuses.

On observe souvent dans les régions polaires de faibles illuminations de l'air sur toute l'étendue du firmament.

Wijkander dit dans son mémoire[1]:

»Tous ceux qui ont fait quelque séjour dans les régions arctiques ont observé qu'en hiver la nuit n'y est jamais aussi obscure que dans les contrées plus méridionales et que, sans qu'on puisse découvrir aucune trace distincte d'aurore boréale, le ciel y offre un aspect plus clair et un peu grisâtre. Ce cas se présente même assez souvent à des latitudes moins élevées, p. ex. en Scandinavie. Quant à son origine, ce phéno-

[1] l. c., p. 53.

mène provient peut-être en grande partie des faibles courants électriques qui passent continuellement par l'atmosphère. Bien des fois, au moyen du spectroscope, je suis parvenu à prouver l'existence de la lumière de l'aurore boréale, quoiqu'il ait été impossible de la découvrir à l'œil nu.«

Des observations analogues ont été faites par Lemström à Sodankylä en 1882—1883. Elles sont décrites au 3ème vol. des rapports sur l'Expédition polaire Finlandaise.[1]

Etant donnée notre conception des arcs auroraux, on pourra facilement se représenter d'une façon plausible la cause pour laquelle, sous des arcs éloignés, on voit souvent un »segment obscur«. D'ordinaire, ce phénomène est attribué tout simplement à l'effet du contraste.

Nordenskiöld a designé ce segment par un nom bien expressif : il l'appelle segment non-lumineux.[2]

D'accord avec ce que j'ai mentionné plus haut, il semble naturel d'admettre que l'air situé au-dessous de la délimitation fortement lumineuse de l'arc auroral est obscur parceque, dans ces couches atmosphériques basses et lointaines, il ne passe pas de courants électriques, tandis que l'air situé au-dessus de l'arc, jusqu'au lieu d'observation et au-dessus de ce dernier, est faiblement éclairé parceque, dans cette région, il passe partout des courants dans les couches supérieures de l'atmosphère.

On peut citer, à l'appui de cette manière de voir, une observation intéressante de Carlheim-Gyllensköld.[3]

»Mais l'apparence sombre du segment ne dépend pas seulement du contraste avec l'arc auroral : dans l'observation citée, le ciel était en effet couvert d'un voile faiblement lumineux dont on a pu constater la présence à l'aide du spectroscope. Mais en braquant le spectroscope sur le segment obscur, on n'y a pas vu la raie caractéristique de l'aurore boréale.«

Une observation semblable a été faité ultérieurement.

Fils. »Rayons lumineux excessivement ténus d'une longueur très-variable, dans la direction du zénith magnétique.

Ils sont toujours groupés de telle sorte qu'ils offrent l'image d'un éventail couvrant une fraction plus ou moins grande du firmament. Ils ne sont pas reliés entre eux, mais séparés par des espaces sombres.

[1] Sur les phénomènes de lumière, naturels et artificiels, de la nature de l'aurore boréale. T. 3. Helsingfors 1898.

[2] Nordenskiöld: Sur les aurores boréales vues pendant l'hivernage de la Véga.

[3] Carlheim-Gyllensköld: Aurores boréales. Observations faites au Cap Thordsen par l'expédition suédoise 1882—1883. Tome II, 1. Stockholm 1886.

Le mouvement des rayons est tout particulier. Ils s'allongent ou se raccourcissent dans le sens vertical, mais rarement avec une bien grande vitesse, assez peu par propagation de la lumière de bas en haut ou inversement, mais plutôt comme si une partie jusque là obscure des différents rayons se trouvait frappée par une source lumineuse.

Le flamboiement des fils se produit seulement en général lorsqu'il y a formation d'une couronne, alors que le firmament est en tout ou en partie couvert de fils.

La relation étroite entre les bandes et les fils se manifeste fréquemment d'une facon bien claire par le mode de leur groupement. La bande forme en effet la lisière inférieure, large et fortement lumineuse de la série des rayons. C'est spécialement ce qui a lieu lorsque la bande se compose, non pas exclusivement de matière lumineuse, mais de rayons groupés en rangs serrés les uns contre les autres.« [1]

Fils et rayons forment de nombreuses combinaisons, des constellations variées, et constituent une portion intégrante des rideaux, des draperies, des éventails, des écrans et des voiles.

Les fils dans les aurores polaires correspondent évidemment dans nos expériences aux aiguilles lumineuses qui font leur apparition dans différentes circonstances. Celles-ci pouvaient lorsque les décharges sont fortes, se présenter de façon à remplir tout un espace donné, de telle façon qu'on voyait souvent les aiguilles lumineuses séparées les unes des autres par du gaz peu lumineux; le courant principal lui-même ne se manifestait alors pas aussi distinctement par des lueurs dans sa direction que le font les aiguilles lumineuses d'origine secondaire descendant verticalement des lignes de courant.

Lorsque les décharges étaient moins fortes, les aiguilles lumineuses pouvaient cependant apparaître associées avec les bandes lumineuses de courants de telle sorte que les aiguilles serrées les unes contre les autres formaient une draperie à structure rayonnée.

Dans les aurores boréales, les fils se présentent justement de ces deux façons.

D'après notre manière de voir, ces fils sont formés de rayons cathodiques diffusés par les masses gazeuses, lorsque celles-ci sont parcourues par le courant primaire dans les couches supérieures de l'atmosphère. Chaque rayon cathodique ainsi produit s'enroule, par suite du magnétisme terrestre, approximativement le long d'une ligne géodésique tracée sur son cône conjugué dont, dans ce cas, l'angle au sommet est très-petit. [2]

---

[1] Carl Weyprecht, l. c.

[2] Arch. des Sc. phys. et nat. Tome VI, p. 223, 1898.

Le cône contient comme génératrice la ligne de force magnétique admise droite passant par la molécule gazeuse qui émet le rayon cathodique considéré.

Comme on peut aisément le montrer, les angles formés par les rayons cathodiques diffusés avec les lignes de force magnétiques doivent ici être très-faibles.

La longueur des fils est excessivement grande dans les aurores polaires; il me parait probable que, dans des circonstances données, ils peuvent atteindre une longueur de 100 km. Cette longueur dépend certainement en première ligne de la densité de l'air, de la composante verticale du magnétisme terrestre, de l'intensité du courant primaire parallèle à la surface de la Terre, et des actions électrostatiques. Ces deux derniers éléments étant fréquemment sujets à des variations subites, il est naturel de chercher à leur attribuer en grande partie les changements considérables et variables dans la longueur des fils.

Les fils sont bien formés de rayons cathodiques : c'est ce qui semble tout-à-fait probable d'après les »Résultats de quelques mesures faites par M. Scheiner de parties correspondantes des spectres de l'aurore polaire et de la lumiére cathodique de l'azote«, publiés par Adam Paulsen.[1]

M. Paulsen avait déjà signalé l'accord intime qui existe entre le spectre auroral et celui de la lumière cathodique paraissant dans un tube spectral qui contient de l'azote et de l'oxygène.

Dans la partie la plus réfrangible du spectre de la lumière cathodique, les raies qui ont été photographiées en Islande par Adam Paulsen appartiennent au spectre de l'azote.

Voici comment M. Scheiner s'exprime après avoir discuté les mesurages faits par lui.

»Pour moi, il est indubitable que le spectrc des aurores boréales contient le spectre cathodique de l'azote.«

Couronne. »C'est une réunion en perspective des rayons ou de la matière lumineuse autour d'un centre déterminé, voisin du zénith magnétique, avec mouvements plus ou moins intenses autour de ce centre. Le phénomène peut prendre un développement tel que des milliers de dards courts et larges s'élancent simultanément de tous côtés dans la direction du centre, ou partent de ce centre, tandis que les fils, qui atteignent une grande profondeur, couvrent tout le firmament, s'allongeant et se raccour-

[1] Bulletin de l'Académie Royale des Sc. de Danemark, p. 91, 1901.

cissant en un mouvement incessant de flamboiement. De larges rayons et flammes intenses lèchent autour du point central, comme si un tourbillon de feu enserrait ce centre dans sa course échevelée.

En général, il y a formation de couronne lorsqu'une aurore boréale de forme prononcée passe sur sa route du Nord au Sud ou inversement au zénith magnétique, c. a. d. lorsque ses rayons, qui dans toutes les aurores convergent à peu de chose près vers un même point du firmament, se trouvent dans la direction allant de ce point à l'œil de l'observateur.

Lorsque la formation de la couronne a lieu dans toute son intensité avec une même bande pour origine, on voit déjà les larges rayons jaillir de cette bande vers le zénith, alors que la bande en est encore loin, et elle se résout en une mer pantelante de flammes et de rayons bien avant d'avoir atteint le zénith. La cause de la couronne réside uniquement dans la bande : c'est ce qu'on reconnait au moment où la couronne ayant disparu du côté de l'horizon où l'on ne voyait auparavant aucune lueur d'aurore, on y voit apparaître une bande plus ou moins intense.«[1]

Conformément à la manière de voir adoptée ici, la forme coronale de l'aurore polaire se manifesterait quand un ou plusieurs rameaux de courant relativement larges, très-intenses et très-denses, situés dans les couches supérieures de l'atmosphère, se déplacent dans le sens transversal et passent au dessus du lieu d'observation. En raison du magnétisme terrestre, il doit se produire alors en tous les points du courant de longues aiguilles lumineuses suspendues verticalement le long des lignes de force magnétiques, à peu près comme dans notre expérience.

Si les circonstances sont favorables et si le courant parallèle à la surface de la Terre est suffisamment intense, en verra jaillir de gros éclairs ou dards verticaux le long des lignes de force, tout comme nous l'avons vu dans nos essais.

Par suite de la perspective, ces dards se réuniront pour l'œil de l'observateur, de façon à former une couronne aurorale avec rayons partant du zénith magnétique et s'élançant dans tous les sens.

Au centre de la couronne, on verra la lueur du rameau principal de courant, avec des embranchements pouvant se dérouler en spirales, ainsi que nous l'avons vu, et former ainsi de la lumière tourbillonnante.

Les différentes couleurs que peut revêtir l'aurore boréale, blanchâtre, jaune, vert ou rouge, semblent d'après nos expériences être dues à ce que les rayons traversent des couches aériennes d'inégale densité et d'in-

[1] Carl Weyprecht, l. c.

égale humidité. L'intensité du courant qui occasionne la formation des rayons exerce probablement aussi une certaine influence sur la couleur.

Toutes les théories électriques des aurores boréales édifiées depuis les recherches fondamentales de De la Rive[1] supposent que les courants électriques qui donnent naissance aux phénomènes en question dans les régions polaires se dirigent verticalement de la Terre vers l'atmosphère, ou inversement; la théorie que je viens d'exposer suppose au contraire les courants dirigés horizontalement dans les couches aériennes supérieures.

Il convient pour montrer que la nouvelle théorie est préférable aux théories antérieures de rappeler:

1° que l'existence des courants supposés est prouvée par l'action magnétique qu'ils exercent,

2° qu'il est prouvé expérimentalement que, sous l'influence des forces magnétiques, le courant positif cheminant dans de l'air raréfié peut rester concentré en une bande étroite; que par suite le courant ne se disperse pas toujours dans tout l'espace mis à sa disposition.

3° que l'expérience a montré également que de pareils courants émettent des rayons cathodiques secondaires, qui, contraints par le magnétisme terrestre, donnent lieu à des phénomènes de radiation lumineuse ressemblant aux aurores boréales à structure rayonnée.

Wolf de Zürich ayant montré, en réunissant un grand nombre d'observations, que le retour périodique des aurores et des perturbations magnétiques coincide avec celui des maxima de taches sur la surface du Soleil, on est grâce aux efforts d'un grand nombre d'observateurs, arrivé à se persuader de plus en plus qu'aurores boréales et perturbations magnétiques sont uniquement les manifestations plutôt modestes, les seules qu'il nous soit jusqu'ici donné d'observer, d'un agent cosmique inconnu d'origine solaire et tout différent de la lumière, de la chaleur et de la gravitation.

On supposait depuis longtemps que cet agent inconnu était de façon ou d'autre, de nature électrique. Becquerel père déjà émettait à cet égard des idées très-intéressantes. Toutefois, le sol est encore mal affermi sous les hypothèses émises pour tirer ces questions au clair.

Il est donc absolument nécessaire de suivre encore avec persistance la voie des observations, ainsi qu'on l'a si souvent conseillé : il faut ob-

[1] Auguste de la Rive, Ann. de Chim. et de Phys., juillet 1872, tome XXVI.

server à fond les aurores boréales et les perturbations magnétiques surtout dans les régions polaires, qui sont comme leur vraie patrie. On finira peut-être ainsi, grâce à une connaissance plus approfondie de ces phénomènes, par avoir des indications pas trop vagues sur cet agent cosmique, encore inconnu.

Dans le présent travail, j'ai au § 22 tenu à appeler l'attention sur une des façons dont on pourrait concevoir la relation entre les taches du Soleil et les courants électriques de l'atmosphère terrestre qui peuvent être supposés producteurs de perturbations magnétiques et d'aurores boréales.

Il semble résulter par analogie des expériences que j'ai décrites, que si le Soleil émet des rayons cathodiques ou d'autres rayons de nature analogue, ceux-ci doivent sous l'action du magnétisme terrestre être attirés vers les régions polaires et donner naissance à des tourbillons de courants électriques d'allure définie dans les couches supérieures de l'atmosphère.

Il est bien naturel que les perturbations d'origine thermo-dynamique qui, nous le savons, ont lieu à la surface du Soleil soient accompagnées de puissantes décharges électriques; et par suite, plusieurs savants ont admis que le Soleil émet des rayons cathodiques vers les espaces cosmiques : ils cherchent ainsi à expliquer différents phénomènes cosmiques.

Pour ma part, j'ai été conduit en étudiant la succion des rayons cathodiques par un pôle magnétique, à l'idée que les aurores polaires sont dues à des rayons de cette espèce, émis par le Soleil.

Il n'est pas nécessaire qu'il s'agisse précisément de rayons cathodiques ordinares : les célèbres rayons de Becquerel p. ex. se laissent aussi dévier par des forces magnétiques. En effet Becquerel a, au sujet des rayons émis par le *radium*, fait une expérience analogue à la mienne pour démontrer le phénomène de succion des rayons cathodiques.[1]

Il résulte encore des considérations développées à la page 40 que le magnétisme terrestre est suffisamment intense pour attirer par succion vers les régions polaires même des rayons fort peu déviables; il attire p. ex. sans difficulté des rayons mille fois moins flexibles sous l'effet des forces magnétiques que les rayons cathodiques intervenant dans l'expérience décrite par moi.

Les faits sur lesquels on est en droit de s'appuyer lorsqu'on cherche à rattacher au Soleil les causes des perturbations magnétiques et des aurores polaires sont bien connus.

[1] Henri Becquerel: Sur le rayonnement de l'uranium etc. Rapports presentés au Congrès International de Physique à Paris en 1900. Tome III, p. 64.

D'abord on retrouve exactement pour les perturbations magnétiques, et assez approximativement pour les aurores polaires, une période correspondant à la période undécennale des taches du Soleil.

On peut en outre invoquer une série de cas où la formation de vastes taches dans les parties centrales du disque solaire a été accompagnée de violents orages magnétiques sur la Terre, et d'aurores polaires d'une abondance inusitée. Un des cas les plus remarquables de cette espèce, pour la période la plus récente, eut lieu le 9 septembre 1898, époque où une vaste tache solaire était tournée vers la Terre, en même temps qu'étaient déchaînés des orages magnétiques et qu'on observait sur des points innombrables des aurores polaires extraordinaires.

J'ai recueili un certain nombre de communications sur ces aurores polaires; parmi les plus intéressantes, il y en a qui ont été notées dans la Norvège septentrionale, et d'autres qui ont été mises à ma disposition par M. Stenberg de Helsingfors, qui se trouvait à cette époque près de Naryim sur l'Ob par environ 59° de latitude et à 3°5 à l'ouest de Tomsk.

En Sibérie, tout comme en Norvège, les aurores boréales semblent avoir fait une apparition assez subite, et d'abord sous forme d'arcs surbaissés dans la direction du Nord. En Sibérie, ils étaient surtout saillants vers 7 à 8^h, heure locale, tandis qu'en Norvège on les observa un peu plus tard d'après l'heure de l'Europe moyenne, de telle sorte que l'écart entre les temps de la première observation des aurores boréales aux deux endroits peut être estimé à 6 heures environ.

Il semble donc que la cause des aurores polaires se déplace en sens inverse de la rotation terrestre, mais ce déplacement doit certainement avoir lieu avec des sauts brusques.

Des sauts analogues ont lieu aussi, comme on peut en juger par la pl. II, pour les déplacements du courant électrique dans les couches supérieures de l'atmosphère.

En effet, les diagrammes pour Bossekop et Jan Mayn montrent que les courants les plus puissants sont principalement dirigés entre ces deux stations. Ils ne se meuvent donc pas régulièrement d'Est en Ouest en passant par Bossekop, mais font subitement leur apparition à l'Ouest de cette station.

Il ne parait d'ailleurs pas improbable que des courants électriques dans un espace rempli d'air raréfié changent brusquement leur direction, par suite de conditions magnétiques et électrostatiques variables. Par exemple, on réussit souvent dans un tube de décharge à faire varier subitement de position une ligne de courant fortement lumineuse en posant le doigt au dehors sur le tube de décharge.

Il est difficile d'avoir d'opinion arrêtée sur la raison qui fait que, dans le cas présent, les courants ont passé de préférence par dessus la Mer de Norvège entre la Norvège et le Grœnland.

En dehors du Soleil, la Lune aussi exerce sans nul doute une influence sur les perturbations magnétiques et sur les aurores polaires.

Il est en effet prouvé d'une part qu'il y a dans les perturbations magnétiques une période diurne suivant les heures lunaires. D'autre part, on a observé que le nombre des aurores boréales diminue lorsque la Lune est au Nord de l'Equateur, tandis qu'il en est de même des aurores australes lorsque la Lune est au Sud de l'Equateur.

En partant des idées que je viens d'exposer, ces phénomènes trouveront certainement le plus facilement leur explication si l'on admet que tout comme la Terre, la Lune est magnétique.

Dans ce cas, il est clair que le faisceau de rayons cathodiques qui sont aspirés vers la Terre, devront être très-notablement déviés de leur trajectoire, s'ils se rapprochent assez de la Lune, alors même qu'on admettrait que celle-ci ne possède qu'un magnétisme très peu intense.

Ce qui s'accorde bien aussi avec cette façon de considérer les choses, c'est l'influence apparente de la Lune sur l'électricité atmosphérique. Il n'est donc pas nécessaire, pour expliquer cette influence, d'avoir recours à une hypothèse aussi peu probable que celle qui voudrait que la Lune eût une charge électrique 1000 fois supérieure à celle qui règne sur le globe terrestre.[1]

Dans mon hypothèse, destinée à expliquer la liaison existant entre les taches du Soleil et les perturbations magnétiques et aurores polaires sur la Terre, j'ai admis que lors de ses fortes éruptions, le Soleil émet des courants de corpuscules chargés négativement, de même nature que ceux dont on admet généralement, avec les physiciens anglais, que se composent les rayons cathodiques.

Dans ces temps derniers, Arrhenius[2] a énoncé l'opinion que ces véhicules d'électricité négative entre le Soleil et la Terre ne sont pas aussi petits que je l'ai prétendu, mais qu'ils peuvent avoir une étendue linéaire d'un ordre qui peut atteindre 1 μ et qu'ils sont écartés du Soleil par suite de la force répulsive de la lumière.

Il me semble que l'ypothèse qui nous occupe ne gagne rien à cette modification. Mais dans le travail de M. Arrhenius elle a perdu son côté le plus utile et le plus suggestif, lorsqu'il s'agit d'expliquer les phéno-

[1] Ekholm et Arrhenius, Bihang t. K. Sv. Vet. Akad. Handl. 19. Afd. 1. 35. 1894.

[2] Arrhenius, Ueber die Ursache der Nordlichter, Phys. Zeitschr. 2. Jahrg. No. 6 u. 7.

mènes des aurores; je parle ici de la succion magnétique autour des pôles magnétiques de la Terre de ces véhicules d'électricité.

Nous pouvons évaluer la vitesse maximum avec laquelle une sphère de densité égale à l'unité, d'un diamètre de 1 μ et d'une charge électrique correspondant à un potentiel de 10000 volts dans l'éther libre pourra se déplacer de façon à pouvoir être aspirée de l'espace cosmique vers les régions polaires de la Terre en raison du magnétisme terrestre. Nous laisserons hors de compte la gravitation et la force électrostatique exercée par la Terre et nous admettrons provisoirement que celle-ci soit en repos relativement au Soleil.

Appelons m la masse de la particule, sa charge électrique e, et sa vitesse v. Si la particule se meut perpendiculairement aux lignes de force magnétiques dans un champ homogène d'intensité H, nous aurons, en supposant la vitesse v faible relativement à celle de la lumière,

$$\text{(a)} \qquad \frac{mv}{e} = H\varrho,$$

où ϱ est le rayon de courbure de la trajectoire de la particule considérée.

Pour un rayon cathodique ordinaire, on peut admettre un rayon de courbure de 5 m. si le rayon se meut perpendiculairement aux lignes de force magnétiques dans des régions polaires, où l'on peut admettre que l'intensité est de 0.7 C. G. S.

Dans ce cas $H\varrho$ serait égal à 350.

D'après les expériences qui ont été discutées au § 22, on pourra toutefois admettre que même des rayons qui seraient 100000 fois moins déviables sous l'effet des forces magnétiques que les rayons cathodiques ordinaires seront aspirés vers les pôles magnétiques de la Terre.

Nous pouvons alors admettre comme limite supérieure $H\varrho = 35\,000\,000$.

Pour tirer v de l'équation (a), il faut d'abord calculer m et e.

$$m = \frac{4}{3}\pi \cdot 0.00005^3 = \frac{\pi}{6} \cdot 10^{-12}.$$

$$e = \frac{0.00005}{9}\, 10^{-20}\; 10000 \cdot 10^8 = \frac{5}{9} \cdot 10^{-13}$$

unités électromagnétiques.

On a donc:

$$\frac{m}{e} = 3\,\pi.$$

On trouve ainsi comme vitesse maximum

$$v = \frac{35\,000\,000}{3\pi}\ \text{cm.} = 37\ \text{km.}$$

La vitesse la plus grande que puissent avoir les particules dans les conditions ci-dessus n'est donc pas beaucoup différent de celle de la Terre dans sa trajectoire autour du Soleil.

Dans ce cas les particules ne devraient pas s'éloigner du Soleil avec une vitesse propre appréciable pour pouvoir être aspirés vers les pôles magnétiques de la Terre.

L'hypothèse d'un potentiel de 10000 volts est passablement élevée, mais il semble bien que les corpuscules de J. J. Thomson[1] aient une charge correspondante à un potentiel de cet ordre.

Dans ce qui précède, j'ai cherché à expliquer les formes principales d'aurores polaires, en me basant sur différentes expériences, et en admettant, comme point de départ, que la source de ces phénomènes remarquables réside dans les courants qui circulent dans les couches supérieures de l'atmosphère.

Dans l'expérience décrite au § 22, on se rappellera que je mentionne le fait que les rayons cathodiques sont aspirés vers un électro-aimant sphérique en faisceaux cunéiformes, et qu'en même temps, autour de ce globe, il se produit trois tourbillons distincts de courants.

Toutefois on n'a pas constaté encore dans tous les cas la relation existant entre le coin lumineux aspiré et les tourbillons de courants produits simultanément; il est donc fort possible que non-seulement ces tourbillons, mais aussi le coin de rayons cathodiques aspirés doivent jouer un rôle direct dans l'explication de différents phénomènes se rattachant aux aurores boréales.

Ce qui est digne de remarque, c'est que le coin lumineux frappe le globe sur un parallèle situé à 70° environ de l'endroit dans le méridien duquel est situé la cathode, et cela jusque très-avant du côté soir, si l'on admet que la cathode représente le Soleil.

Comme on le sait, Gyllensköld a trouvé, à la suite d'une correction relative au lever du Soleil, que le véritable maximum diurne de la fréquence des aurores boréales doit tomber vers 3^h de l'après-midi. Ceci s'accorderait évidemment bien avec la supposition que certaines aurores boréales peuvent être formées directement par le coin d'aspiration des rayons cathodiques.

---

1 J. J. Thomson, Rapports présentés au Congrès International de Physique, Paris 1900. T. III, p. 139.

27. Sur la formation des nuages supérieurs.

Robert v. Helmholtz a trouvé qu'une »pointe électrique« agit sur un jet de vapeur d'eau situé dans le voisinage, de telle sorte qu'il se produit dans ce jet une violente condensation.[1] Il admettait que cette condensation avait lieu autour d'atomes non-saturés, servant de noyaux.

D'après Lenard, l'air traversé par des rayons cathodiques contient des noyaux aptes à condenser des vapeurs, il agit comme producteur de nuages.[2] »C'est ce qu'on prouve sans peine à l'aide d'un jet de vapeur, à la façon d'Aitken et de R. v. Helmholtz.[3] Si le jet de vapeur se trouve à une distance de 1.5 cm. de la fenêtre munie, comme d'habitude, d'un écran en métal communiquant avec la terre, l'action exercée sur le jet est aussi forte qu'on puisse se l'imaginer : tout le jet apparait en blanc clair, comme un épais nuage.

A la distance de 3 et 4 cm., on constate encore une action des plus puissantes. A 5 cm., l'effet semble varier d'une décharge à l'autre, parfois avec des paroxysmes brusques, parfois avec une grande faiblesse. A des distances plus grandes encore et allant jusqu'à 10 cm., on n'observe plus qu'un effet excessivement peu prononcé, interrompu pourtant dans bien des cas par de fortes actions d'une plus longue durée. Ces dernières ne se manifestent parfois qu'à la partie supérieure du jet. La distance limite pour que l'effet de condensation soit toujours certain, c. a. d. 5 cm., est aussi la distance à laquelle les rayons cathodiques sont encore observables sur l'écran de cétone.

L'effet puissant qui se manifeste parfois à de plus grandes distances est imputable aux courants qui agitent l'air de la chambre, et à la circonstance que l'air conserve son pouvoir condensant, tout comme sa conductibilité électrique, quelque temps encore après avoir été soumis à la radiation.«

On a montré plus tard de la même façon que les rayons de Rœntgen et les émissions du radium condensent aussi la vapeur d'eau.

M. Townsend[4] a découvert que les gaz électrisés possèdent cette propriété remarquable de donner naissance à une sorte de brouillard, quand on les fait pénétrer dans une enceinte contenant de la vapeur d'eau. Ce brouillard se produit alors même que l'enceinte est loin de son point de saturation.

---

[1] R. v. Helmholtz, Wied. Ann. 32, p. 1, 1887.
[2] Lenard, Wied. Ann. 63, p. 258, 1897.
[3] Aitken, Trans. Roy. Soc. Edinb. 30, p. 337, 1881. R. v. Helmholtz, l. c.
[4] Townsend, Proc. of the Cambr. philos. Society.

Il est commode de s'imaginer que les condensations de vapeur d'eau dont il vient d'être question sont provoquées autour de noyaux appartenant à l'une ou l'autre des trois espèces de particules admises par J. J. Thomson pour expliquer le pouvoir conducteur électrique des corps[1], soit corpuscules, soit particules électrisées positivement provenant de la dissociation corpusculaire de molécules primitivement neutres, soit particules électrisées négativement, résultant de la fixation d'un corpuscule sur une molécule neutre frappée par lui.

Avec cette manière de voir, il résulte naturellement que dès qu'on aura prouvé qu'il circule dans les couches supérieures de l'atmosphère de puissants courants électriques, on aura le droit d'admettre du même coup qu'il doit y avoir en abondance, dans ces couches supérieures, de pareilles particules autour desquelles la vapeur d'eau peut se condenser.

Nous allons maintenant aborder cette question : Y a-t-il une relation entre les aurores boréales et certaines productions de nuages; comme on le sait, il a été prétendu depuis longtemps déjà par différents observateurs qu'il y a là une certaine corrélation.

Dans les beaux mémoires d'Adam Paulsen »Sur la nature et l'origine de l'aurore boréale«[2], ce savant a plusieurs fois montré que les rayons auroraux peuvent effectivement être producteurs de nuages.

J'ai moi-même été témoin de la formation d'un nuage, par un ciel d'ailleurs clair, provoquée en une minute ou deux par un faisceau intense de rayons auroraux. C'était vers 9 h du soir, le 15 février 1898, à la station alpine de Gargia à 30 km. environ au Sud de Bossekop. Les rayons du faisceau s'allongeaient et se raccourcissaient d'un mouvement rhytmé et plongeaient pour sûr assez loin dans l'atmosphère.

Vers le bas et autour du faisceau, il se forma un nuage qui au bout d'une minute ou deux cacha le pied du faisceau. Plus tard, l'aurore boréale ayant bientôt cessé, ce nuage se déplaça assez rapidement sous l'effet d'un vent bien fort, et disparut derrière une rangée de hauteurs situées dans le voisinage.

Il est toutefois assez naturel d'admettre que les noyaux de condensation ne se produisent pas exclusivement là où les rayons auroraux sont *visibles;* la cause première de la formation des noyaux doit résider dans le courant électrique parallèle à la surface de la Terre, courant qui s'étend sur de vastes portions de la surface terrestre sans pour cela donner lieu partout à des aurores boréales.

---

1 J. J. Thomson, l. c., p. 149.
2 Voir p. ex. Bulletin de l'Acad. Roy. des Sc. de Danemark, 8 mars 1895.

Nous allons maintenant essayer de voir si la formation des nuages supérieurs ordinaires, cirrus et cirro-stratus, se laisse rattacher d'une façon naturelle à des courants pareils à ceux dont nous avons démontré ici l'existence.

Il y a d'autant plus lieu de faire une pareille tentative que les météorologistes n'ont pas encore réussi à trouver d'autre explication satisfaisante de la production de ces nuages. Je m'en tiendrai ici à une assertion de W. v. Betzold dans une conférence faite à l'»Urania«.[1]

»Il ne reste plus qu'une seùle forme dont je ne puis pas encore, à l'heure qu'il est, donner l'explication exacte, au moins d'une façon générale.

Ce sont les nuages arborescents et plumeux, cirrus ou cirro-stratus appartenant aux régions les plus élevées de l'atmosphère. Il est certainement hors de doute que ces formations délicates sont composées d'aiguilles de glace, ils se laissent d'ailleurs parfois aussi rattacher aux nuages ondulés, mais il me parait actuellement encore impossible d'expliquer dans tous leurs détails leurs formes si nombreuses et si variées.

Il y a donc là un problème dont la solution doit être réservée à l'avenir, problème méritant d'être abordé d'autant plus sérieusement que ces nuages nous apportent le témoignage de phénomènes se déroulant à une très-grande distance de nous, et qui par suite sont considérés à juste titre comme des avant-coureurs du temps qu'il va faire.«

Dans l»Atlas international des nuages« publié par Hildebrandsson, Riggenbach et Teisserenc de Bort, les cirrus sont décrits comme des nuages isolés, délicats, à textures fibreuses, en forme de plumes, généralement de couleur blanche, souvent disposés en bandes qui traversent une partie de la voûte du ciel comme des méridiens, et qui, par un effet de perspective, convergent vers un point ou deux points opposés de l'horizon. Souvent les cirro-stratus et les cirro-cumulus participent à la formation de ces bandes.

On appelle *point de radiation* le point où ces bandes ou leur direction prolongée rencontrent l'horizon.

Ces bandes ou raies à disposition régulière offrent cette particularité qu'elles se produisent presque simultanément et comme par un coup de baguette sur de vastes étendues, de telle sorte qu'une grande partie du ciel d'abord claire se couvre subitement de nuages de cette espèce, ou bien de telle sorte que les nuages couvrant déjà le ciel soient traversés

[1] Himmel und Erde, 1894, p. 201.

tout-à-coup par des sillons, tandis que les nuages eux-mêmes ne progressent que lentement.

L'opinion suivant laquelle les bandes de cirrus seraient dues aux courants électriques dans les couches supérieures de l'atmosphère semble à première vue inconciliable avec le fait qu'on admet en général pour ces mêmes nuages une altitude moyenne de 9000 m. au-dessus de la surface de la Terre, tandis que les courants électriques dont nous parlons se meuvent en tout cas à des hauteurs de 100 kilomètres.

Il convient toutefois d'observer que si même le courant principal est à une très-forte altitude, les rayons cathodiques diffusés par les masses d'air que parcourent lesdits courants pénètrent très-bas dans l'atmosphère.

Ces rayons doivent bien certainement être ordonnés en séries ayant la forme de draperies ou de bandes, alors même qu'ils seraient trop peu intenses pour provoquer dans l'air des lueurs du genre des aurores boréales. Mais si faibles que soient ces rayons, ils donneront lieu à une abondante formation de noyaux pour la condensation des vapeurs aqueuses contenues dans l'atmosphère.

Il est probable que dans les régions polaires de pareils rayons non-lumineux pénètrent bien plus bas dans l'atmosphère que les rayons lumineux de l'aurore boréale.

Il est hors de doute que de pareils rayons ou autres décharges électriques peuvent se propager à travers des gaz raréfiés sans produire de phénomènes lumineux.

Leur existence est admise par J. J. Thomson[1] et elle est prouvée par Warburg[2] et Lenard[3].

Il existe une catégorie spéciale de nuages supérieurs indiquant autrement encore que par leur forme qu'ils sont en relation avec les courants électriques des couches supérieures de l'atmosphère : ce sont les nuages nocturnes lumineux qui ont été observés jusqu'à une hauteur de 80 kilomètres ou même davantage. Surtout dans les régions polaires, il n'a souvent pas été possible de distinguer ces nuages à lueur propre de certaines formes spéciales d'aurore boréale.

Un cas intéressant de cette espèce se trouve décrit par Fridtjof Nansen dans »Fram over Polhavet«, pag. 233, vol. I.

»Vers 3 heures de l'après-midi, le 2 novembre 1893 je vis une forme tout-à-fait particulière de ce genre d'aurore. A l'horizon sud-ouest on voyait

---

[1] J. J. Thomson, Recent researches in electricity and magnetisme, p. 105 et 131, 1893.

[2] Warburg, Ueber die Verzögerung bei der Funkenentladung, Wied. Ann. 62, p. 385, 1897.

[3] Lenard, Erzeugung von Kathodenstrahlen durch ultraviolettes Licht, Drudes Ann. 2, p. 366, 1900.

encore les ardeurs du Soleil. En avant, de légers nuages s'étaient entassés, rappelant un nuage de poussière soulevé dans le lointain par une troupe de cavaliers. De ce nuage s'élevait comme un crèpe noir, montant par bandes vers le ciel, comme s'il fût parti du Soleil, ou plutôt comme si le Soleil pompait à lui le crèpe de poussière par bandes striant tout le ciel. Vers le Sud-Ouest seulement, ces bandes étaient sombres; plus haut, et plus loin du Soleil, elles devenaient blanches et éclatantes, comme une fine dentelle argentée et brillante. Ils s'étendaient sur toute la voûte au-dessus de nous, et jusqu'à la région du septentrion. On eût dit d'une aurore boréale; ou bien étaient-ce de légers nuages, flottant très-haut dans la lumière solaire? Je restai longtemps à les considérer. Le tout était au repos; mais en fait, c'était une aurore boréale qui vers le Sud-Ouest prenait par une lente transition l'apparence de stries obscures, et se terminait par le nuage de poussière en avant du Soleil crépusculaire. Scott-Hansen vit aussi ce phénomène plus tard, lorsqu'il commença à s'obscurcir. Il n'y avait plus de doute possible : c'était, comme il le dit, une aurore boréale s'étendant depuis le Soleil à travers toute la voûte céleste, comme les rayures de l'écorce d'une orange.«

Mon collègue M. Mohn a appelé mon attention sur divers cas du même genre décrits dans les »Meteorologische Beobachtungen an der Universitäts-Sternwarte zu Christiania 1837—1863«, cas où l'on voit que des bandes de cirrus ont paru avoir la même position que des arcs d'aurore boréale.

S'il y a une pareille liaison entre les cirrus, les bandes aurorales et les courants électriques de l'atmosphère, cette liaison sera probablement facile à constater.

Mais il faut qu'on ait bien soin de saisir le moment où de pareilles bandes polaires de cirrus se produisent dans toute leur longueur, comme par un coup de baguette, et de s'assurer alors si la position des bandes répond bien à celle des courants électriques se laissant constater dans l'atmosphère, à l'aide des photogrammes magnétiques provenant des observatoires magnétiques voisins de la région où l'on a fait l'observation des nuages en question.

L'exacte constatation d'une pareille relation nous fournirait des renseignements utiles au sujet de »phénomènes qui se déroulent à une très-grande distance de nous, et qui par suite sont considérés à juste titre comme des avant-coureurs du temps qu'il va faire.«

Il peut être intéressant, dans cet ordre d'idées, de rappeler que les pêcheurs du Finmarken appellent les aurores boréales »vindlys«, c'est-à-dire lueurs de vent. Si, un soir, ils observent une aurore boréale violente

et à incandescences furibondes, ils ne se décident qu'en cas de nécessité absolue à se risquer sur mer le jour suivant.

Plusieurs observateurs semblent aussi avoir observé une relation du même genre entre le vent et l'aurore boréale. Dans »Fram over Polhavet«, vol. I, p. 239, nous trouvons à ce sujet une remarque très intéressante.

La cause primaire de pareilles tempêtes consécutives à des aurores boréales devrait en vertu des idées que nous venons d'émettre, être idéntique à celle qui préside à la production des bandes de cirrus et à celle des aurores boréales elles-mêmes, en un mot, ce doit être le courant électrique dont l'existence est prouvée dans les couches supérieures de l'atmosphère.

L'énergie d'un pareil courant de décharge, dont l'intensité atteint parfois des centaines de mille, ou peut-être même des millions d'ampères semble aussi suffisamment grande pour provoquer ou déchaîner de profonds changement météorologiques.

Ce courant se mesure par ses effets magnétiques; il est donc fort possible que les magnétomètres deviennent un jour pour les météorologistes des instruments tout aussi indispensables que les baromètres et les thermomètres humides ou secs.

Je tiens à adresser ici tous mes remerciments à mon élève et infatigable assistant, M. Olden, qui a dressé les dessins et fait les calculs des chiffres contenus dans les tableaux 1—5.

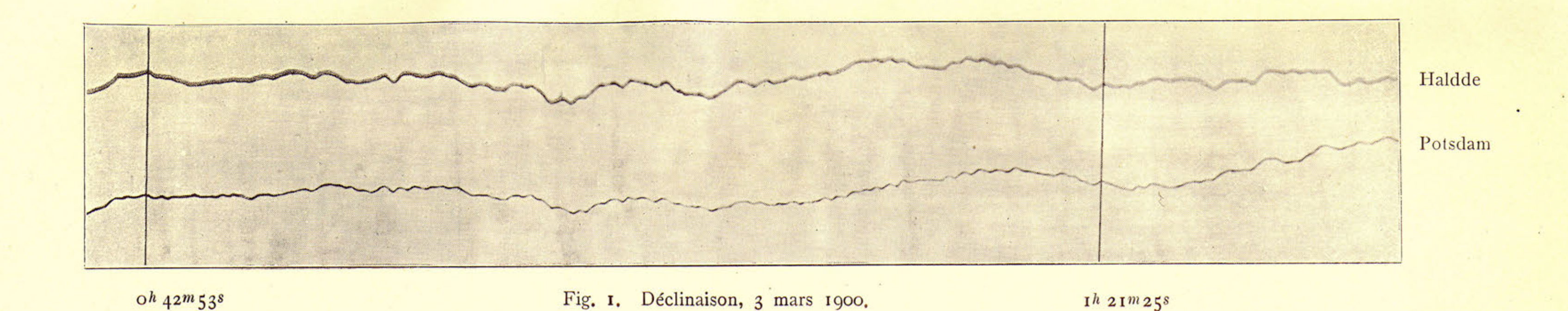


Imprimé le 17 juin 1901.

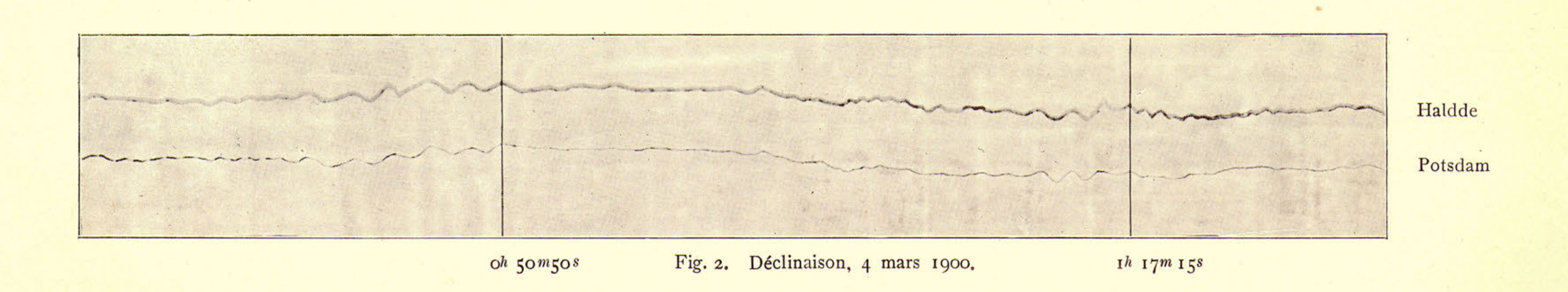
P. S.

J'ai dit à l'occasion de l'expérience relatée p. 58 que la rotation dans les spirales lumineuses des bandes est en sens inverse de celle qui aurait lieu si la force magnétique eût agi sur un fil conducteur de courant flexible. En examinant soigneusement les phénomènes lumineux au voisinage immédiat de l'embouchure du tube étroit, au centre de la grosse sphère, on aperçoit cependant, quand la force magnétique est très-intense, en dehors des grosses bandes spirales, une petite étoile lumineuse ayant à peu près 1 cm. de diamètre d'où partent 5 ou 6 bras recourbés dans le *même* sens qu'avec un fil flexible de courant.

En employant le tube mentionné p. 54, on peut obtenir une pareille étoile atteignant jusque 3 cm. de diamètre environ. Cette étoile a 5 ou 6 bras courts, courbés comme les précédents; ils se forment, dans le manchon ellipsoïde, en partant de l'ouverture large de 3 mm. située à l'extrémité positive de la gouttière demi-cylindrique. Ces bras sont, comme les bandes, composés de rayons serrés les uns contre les autres et dirigés le long des lignes magnétiques.



$0^h\,42^m\,53^s$ Fig. 1. Déclinaison, 3 mars 1900. $1^h\,21^m\,25^s$



$0^h\,50^m\,50^s$ Fig. 2. Déclinaison, 4 mars 1900. $1^h\,17^m\,15^s$

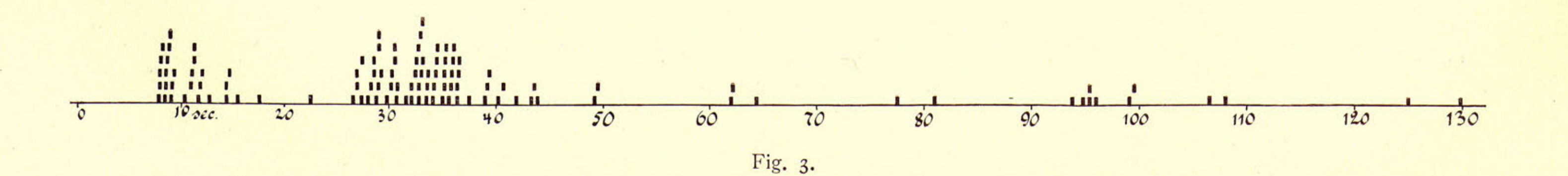
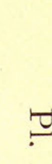
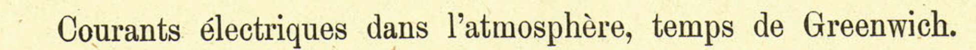


Fig. 3.





Courants électriques dans l'atmosphère, temps de Greenwich.

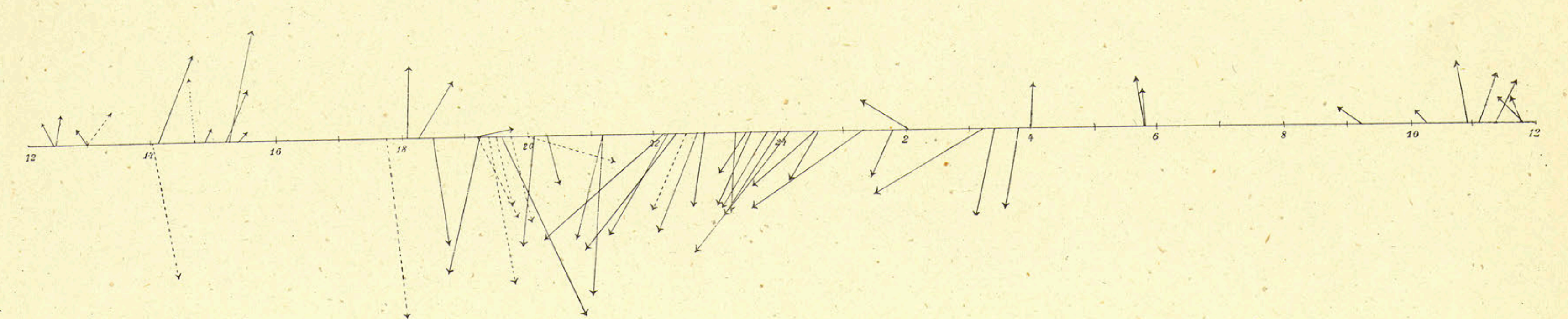


Fig. 1. Bossekop, hiver 1899—1900.

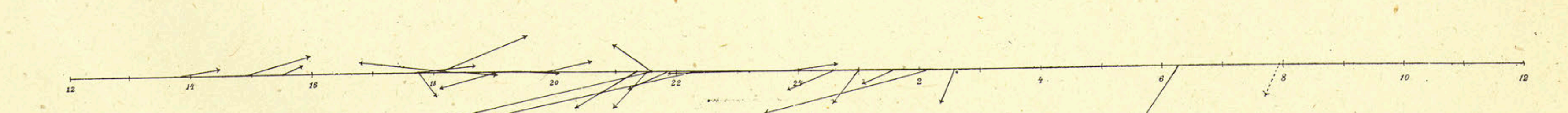


Fig. 2. Bossekop, hiver 1882—1883.

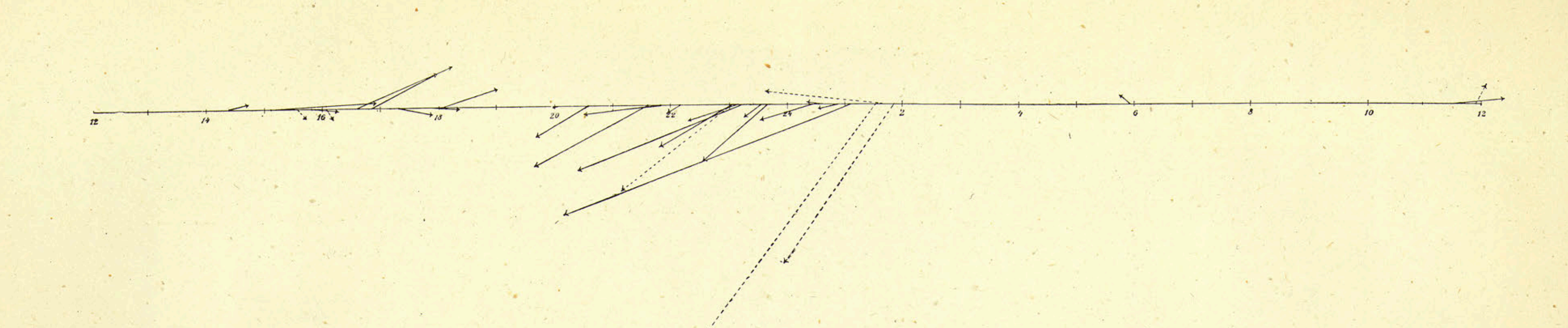


Fig. 3. Bossekop, été 1882—1883.

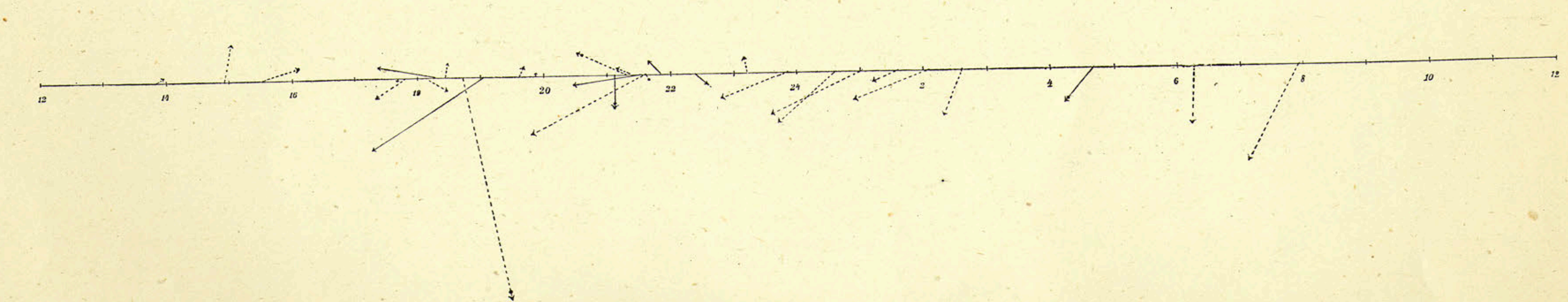


Fig. 4. Jan Mayn, hiver 1882—1883.

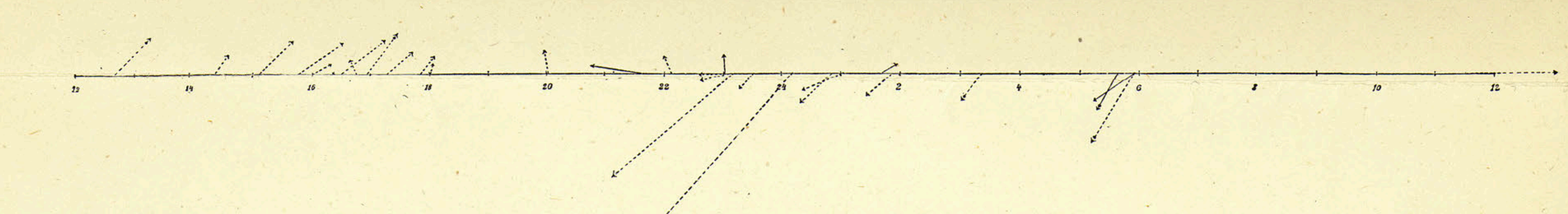


Fig. 5. Jan Mayn, été 1882—1883.

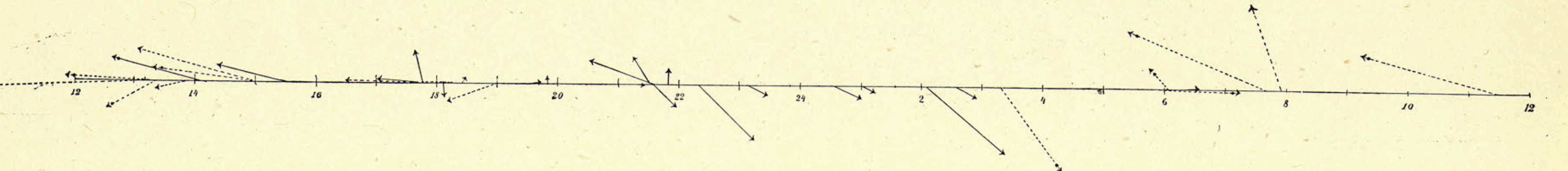


Fig. 6. Fort Rae, hiver 1882—1883.

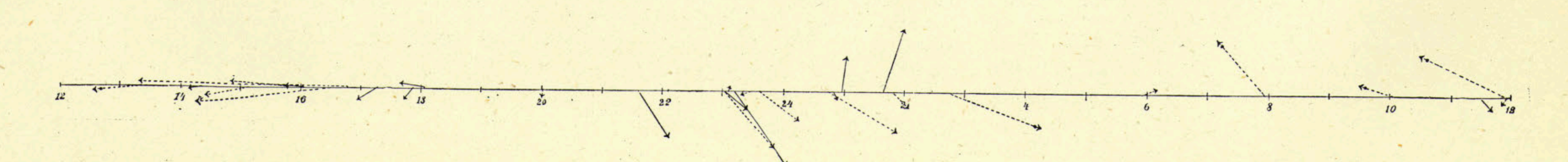


Fig. 7. Fort Rae, été 1882—1883.

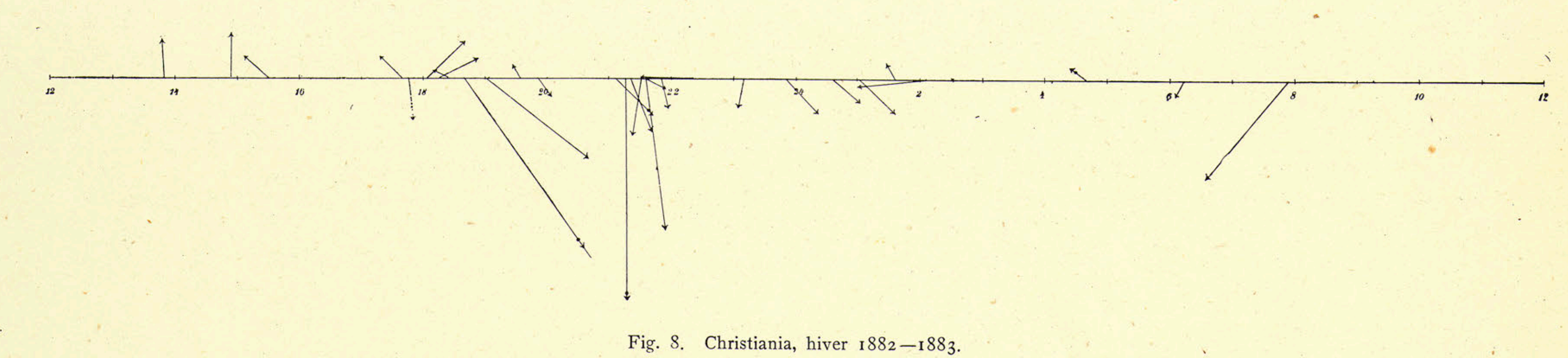


Fig. 8. Christiania, hiver 1882—1883.

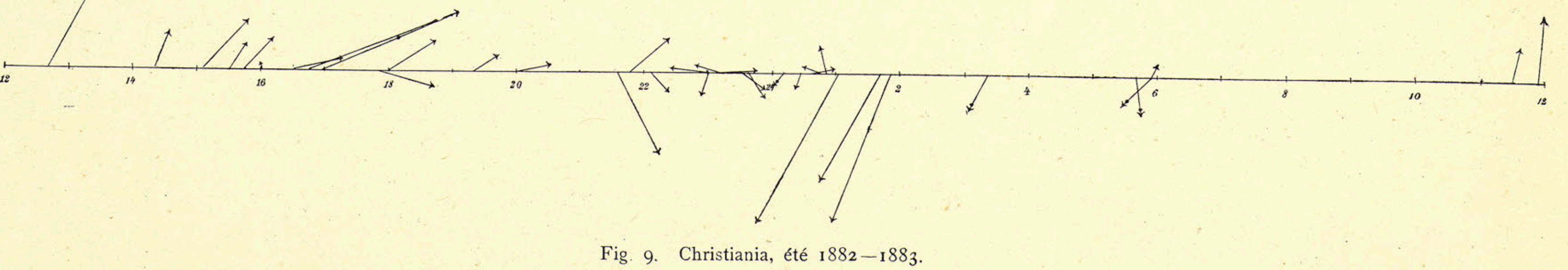


Fig. 9. Christiania, été 1882—1883.

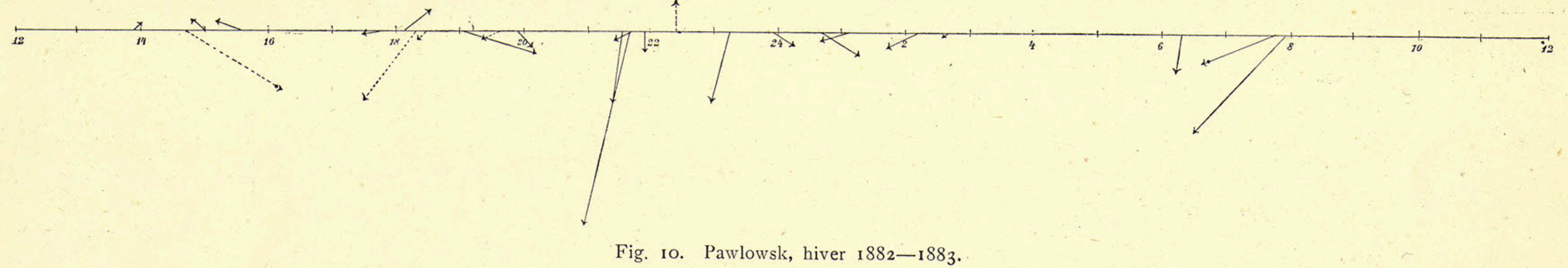


Fig. 10. Pawlowsk, hiver 1882—1883.

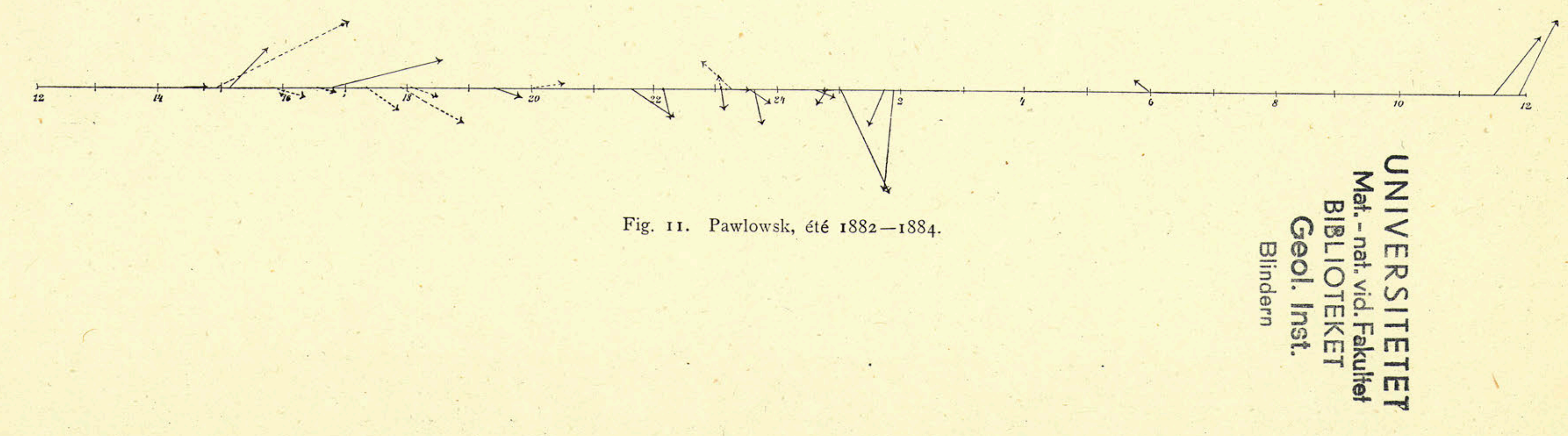
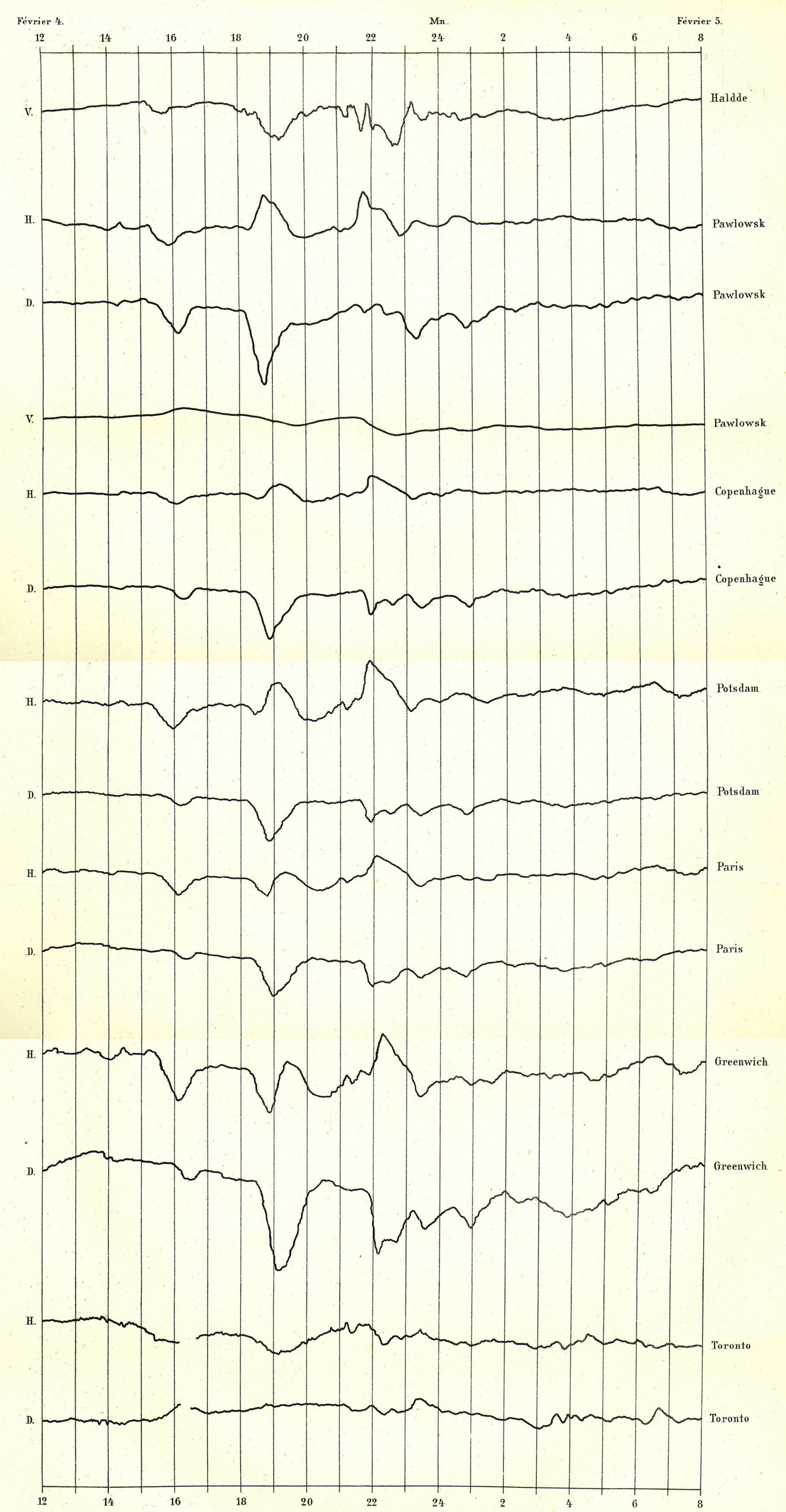
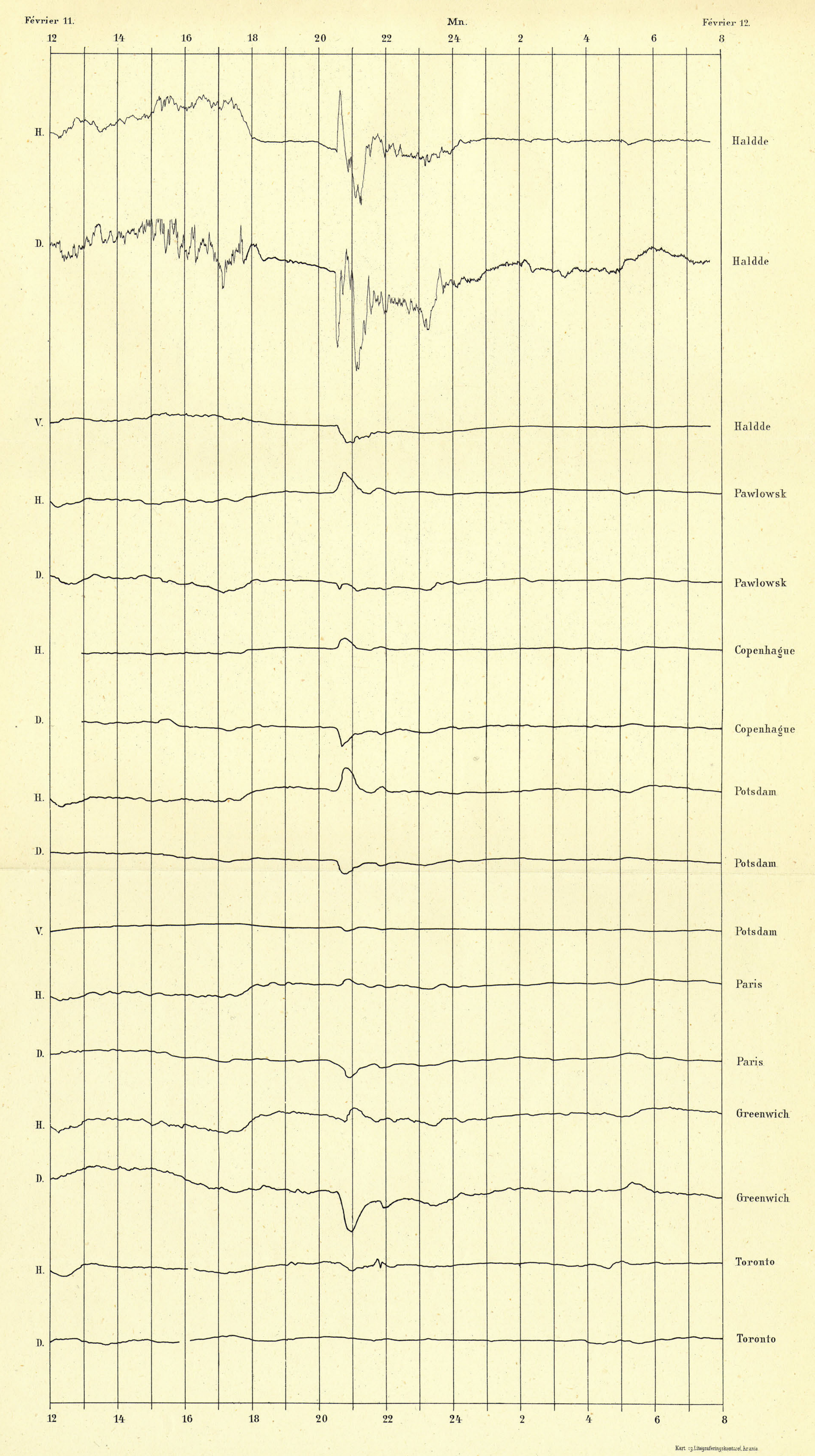


Fig. 11. Pawlowsk, été 1882—1884.

Perturbations du 4–5 février 1900.

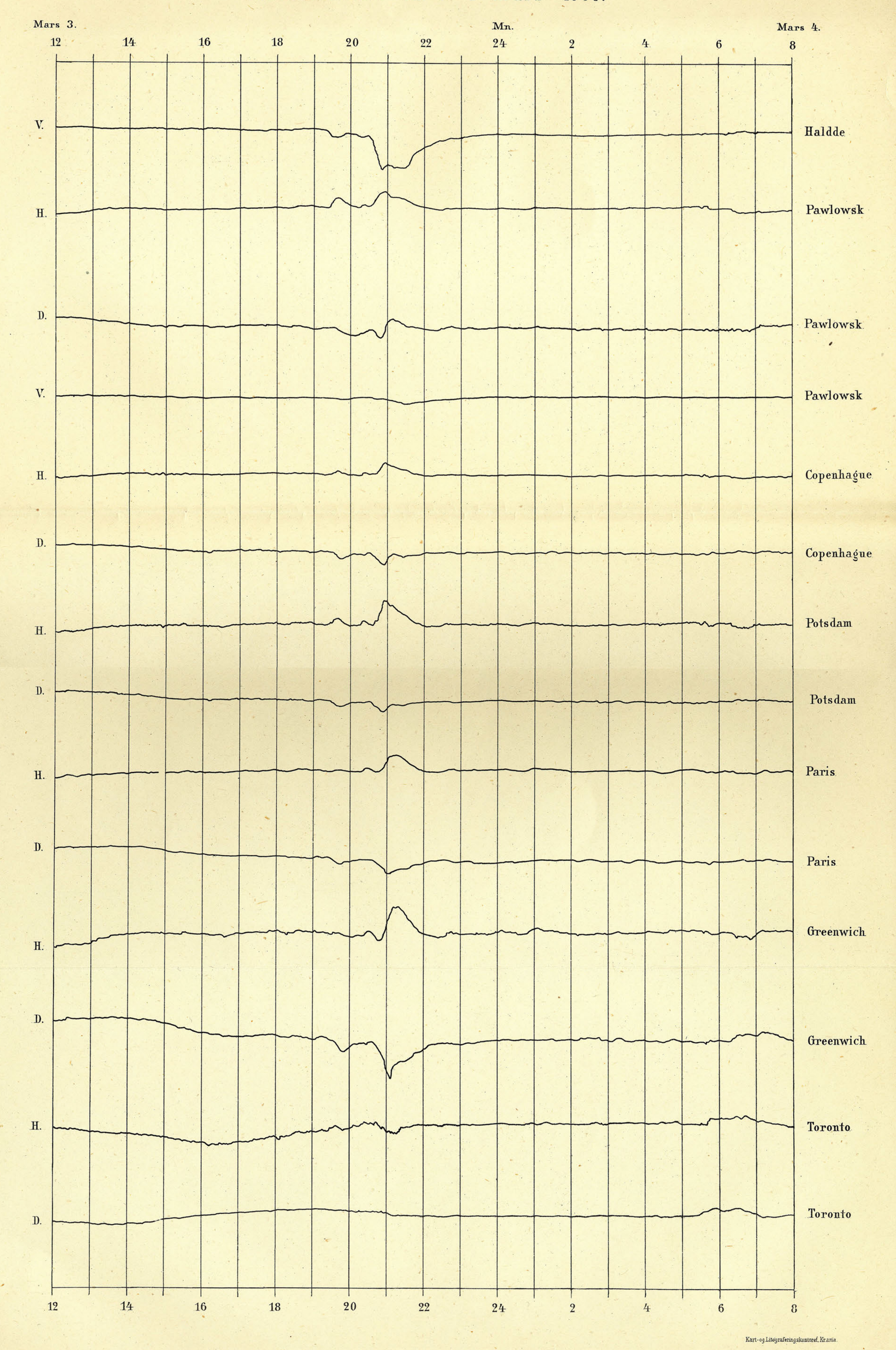


Perturbations du 11—12 février 1900.


Kart og Litograferingskontoret, Kr.ania.

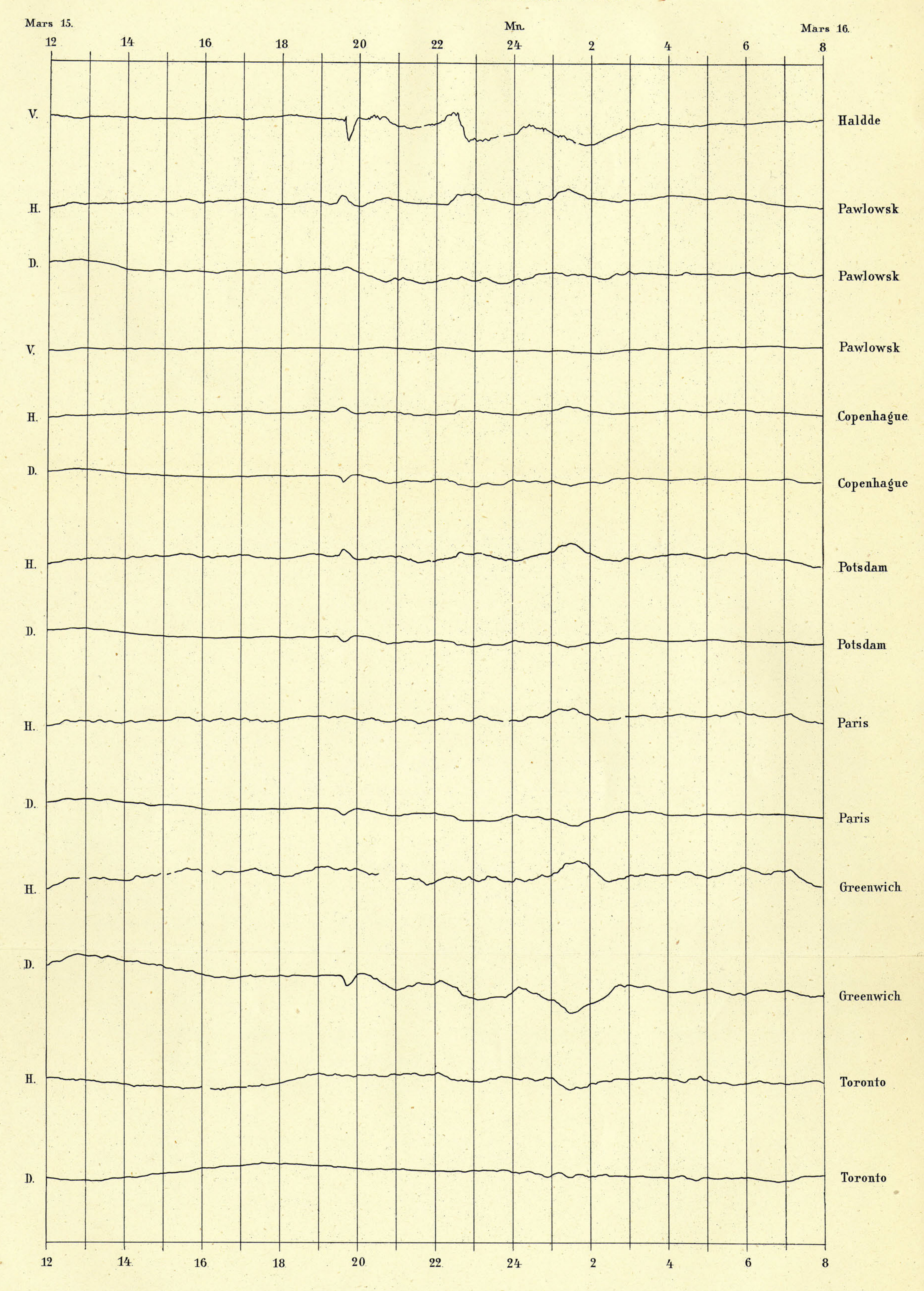
Perturbations du 3–4 mars 1900.



Kart-og Litografingskontoret, Kr.ania.


Perturbations du 13-14 mars 1900.
Mars 13.
Mn.
Mars 14.
12
14
16
18
20
22
24
2
4
6
8
V.
Haldde
H.
Pawlowsk
D.
Pawlowsk
V.
Pawlowsk
H.
Copenhague
D.
Copenhague
H.
Potsdam
D.
Potsdam
V.
Potsdam
H.
Paris
D.
Paris
H.
Greenwich
D.
Greenwich
H.
Toronto
D.
Toronto
V.
Toronto

Perturbations du 15–16 mars 1900.



Kart- og Litografieringskontoret, Kr.ania.

Courants électriques dans l'atmosphère, février et mars 1900.

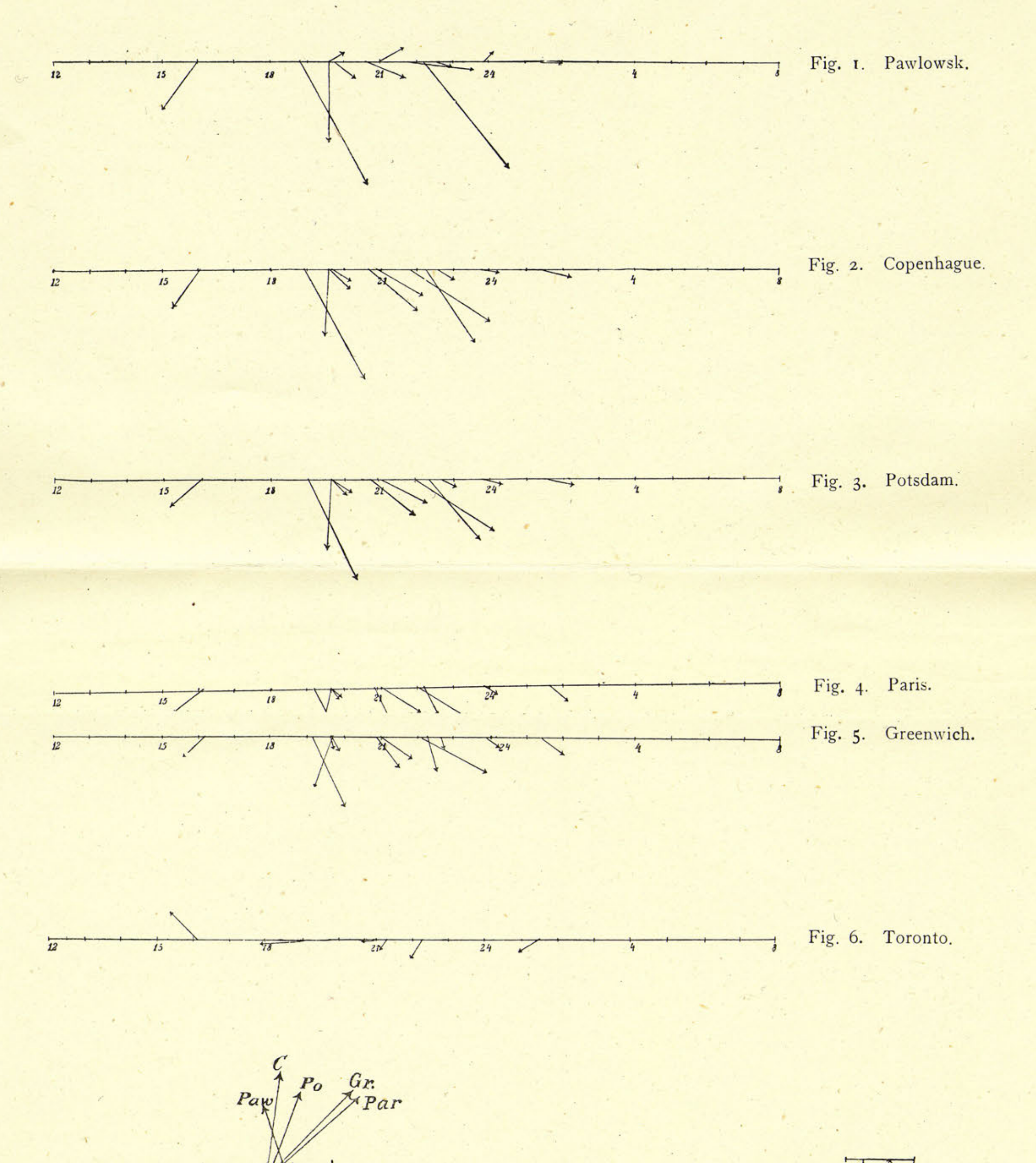
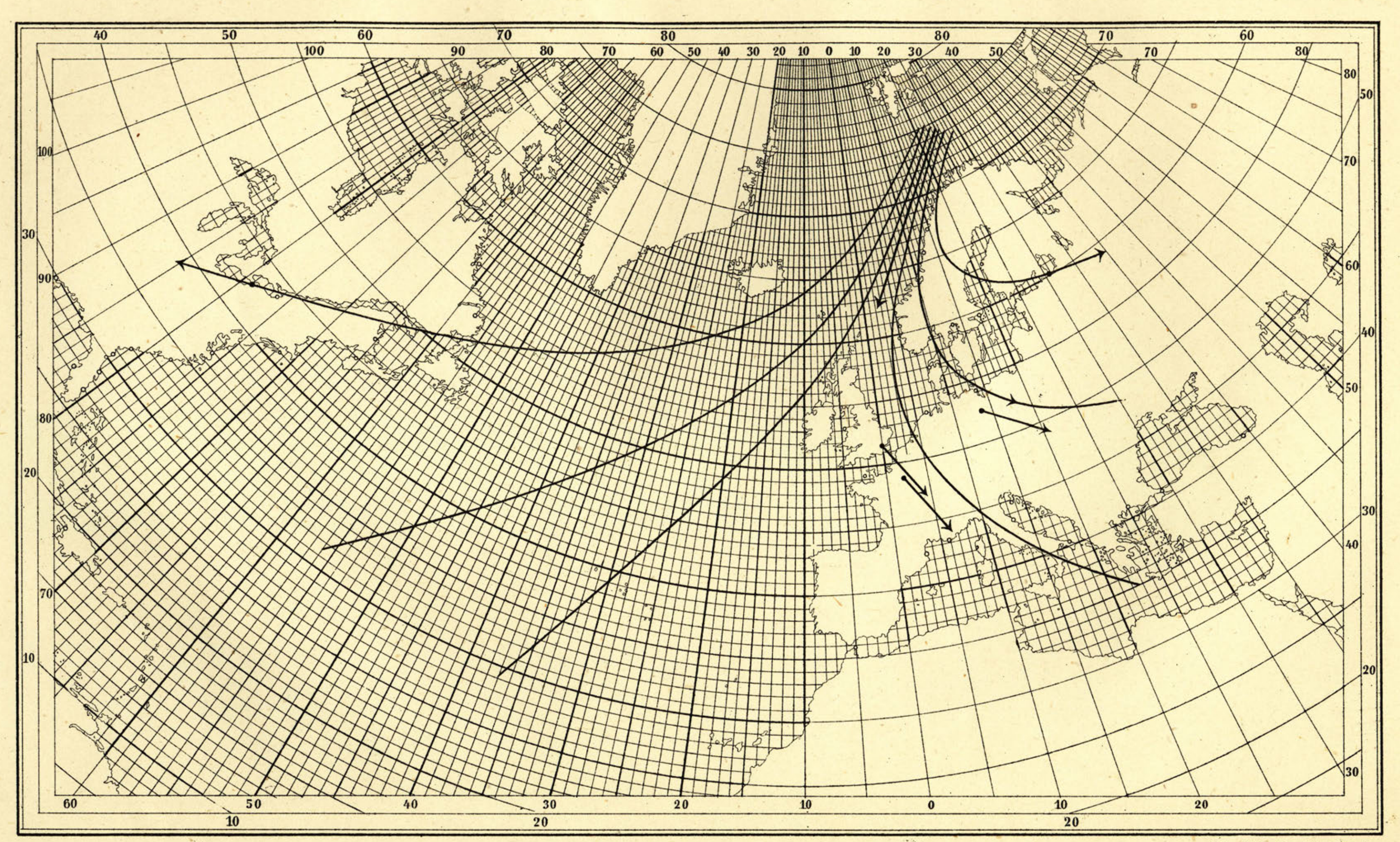


Fig. 8.

Fig. 7.

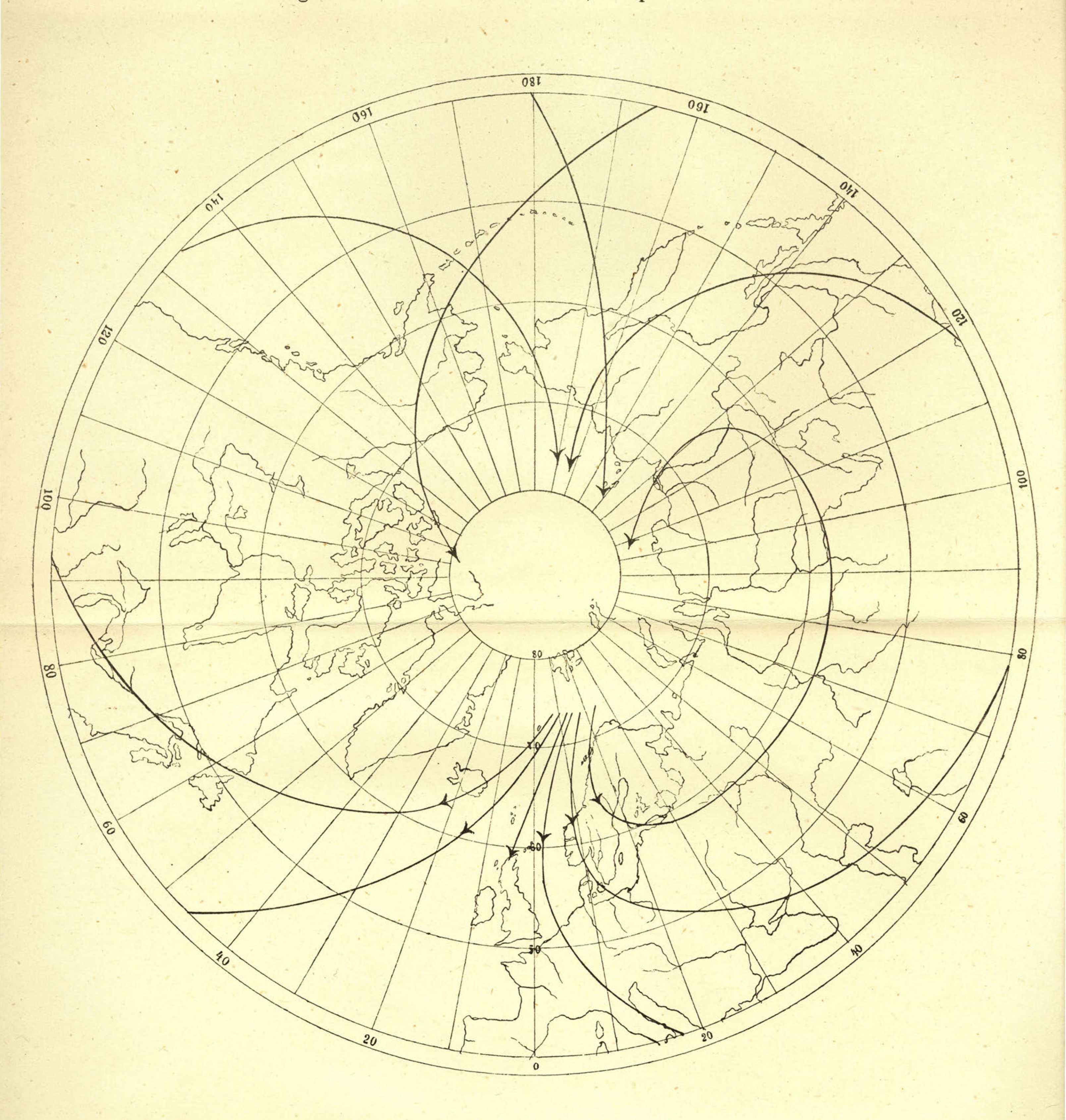
Lignes de courants vers minuit, temps de Greenwich.



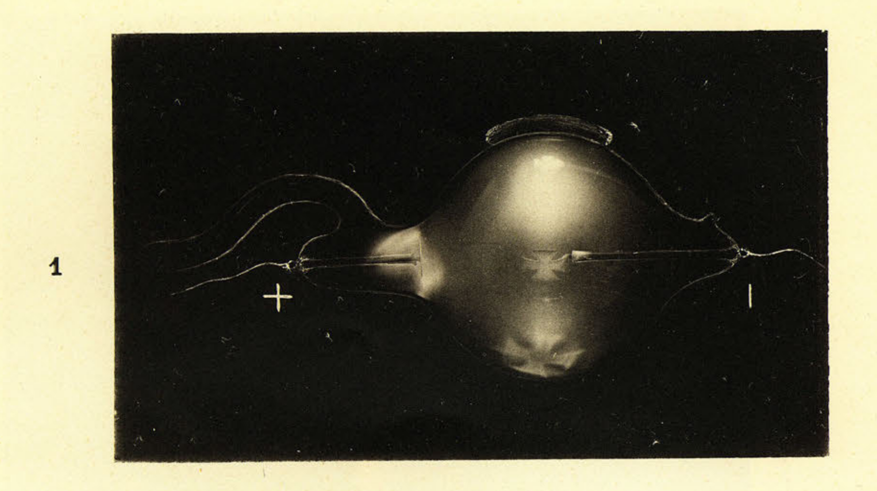
Kart- og Litograferingskontoret, Kr. ania

PL. IX.

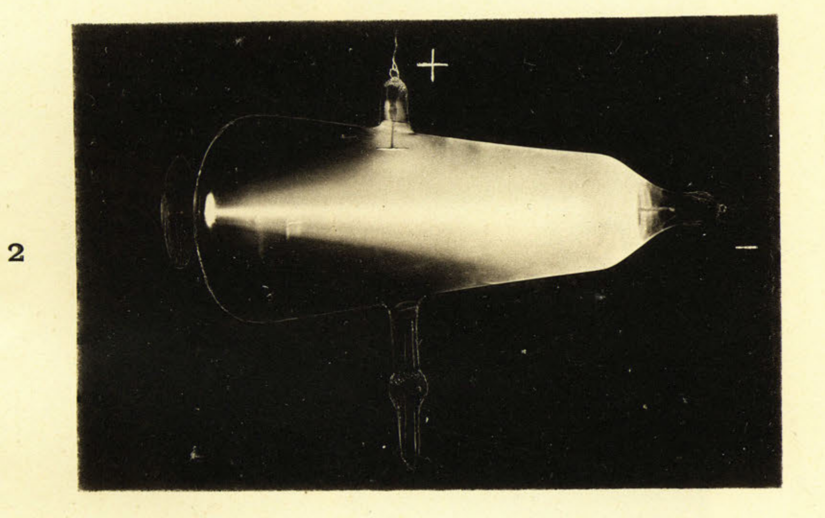
Lignes de courants vers minuit, temps de Greenwich.



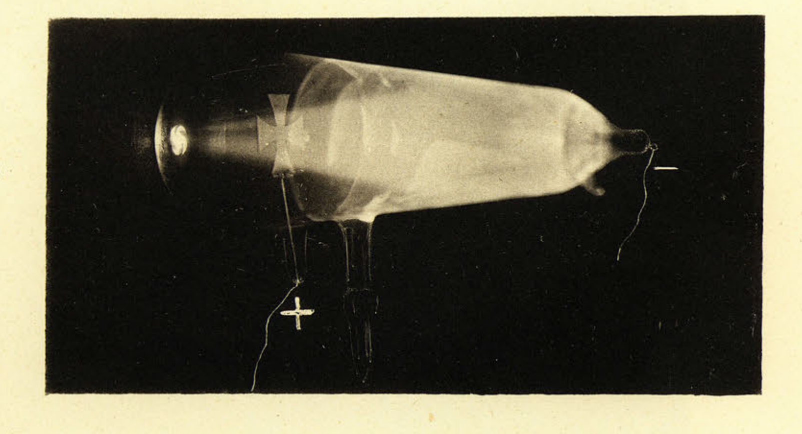
1

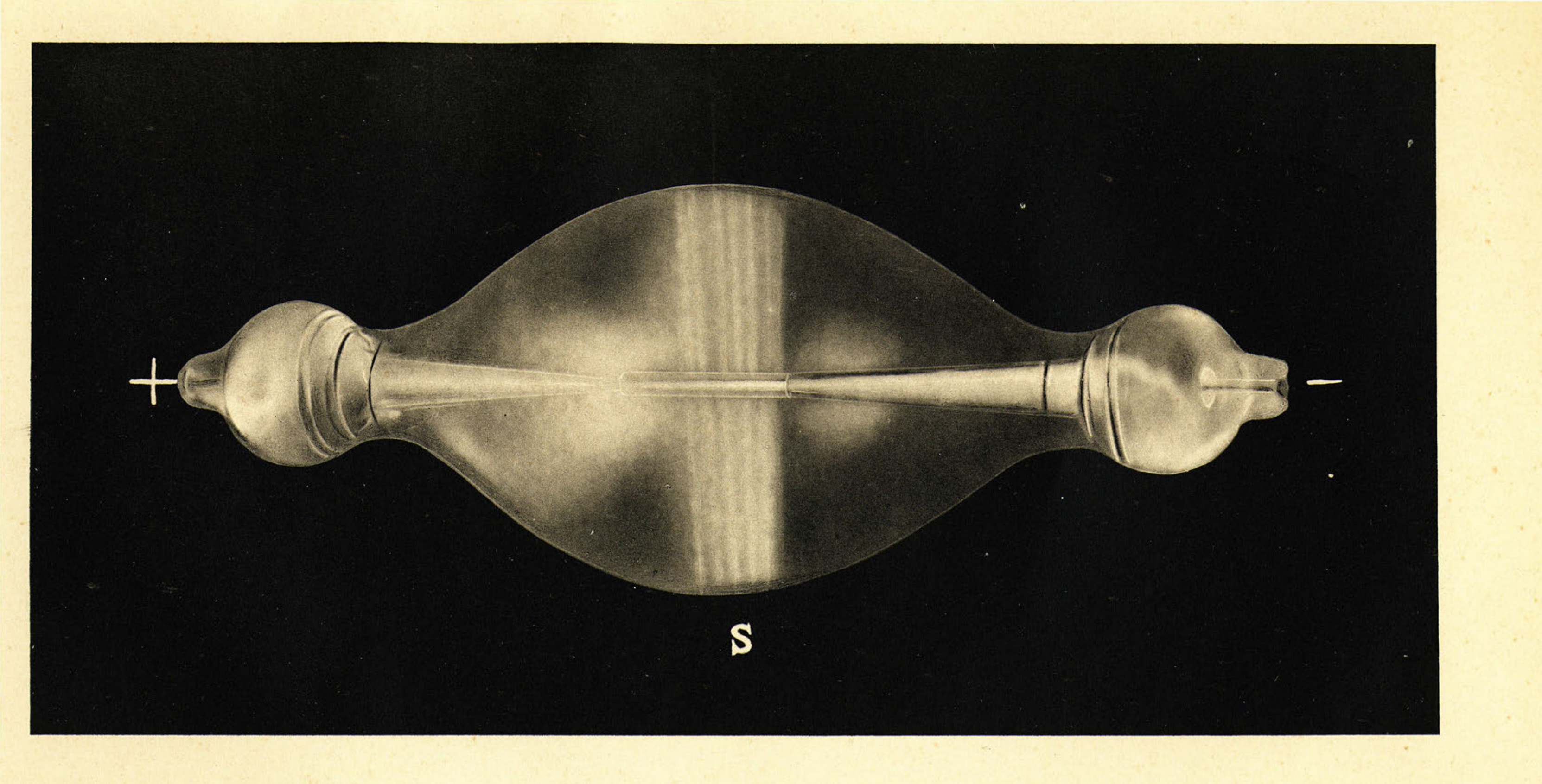


2



3





Mince rideau lumineux rappelant les aurores polaires à structure rayonnée.

PL. XII

